

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Milić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Matej Milić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Goranu Krajačiću te asistentu Nikoli Mataku na strpljivosti, velikoj pruženoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji, prijateljima i svim profesorima na podršci za vrijeme studiranja i pisanja ovog rada.

Matej Milić

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Matej Milić

Mat. br.: 0035193961

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:**Isplativost tehnologija za skladištenje energije u pokrivanju
energetskih potreba Grada Dubrovnika iz obnovljivih izvora energije**Naslov rada na
engleskom jeziku:**Profitability of energy storage technologies in covering of energy needs
of the City of Dubrovnik with renewable energy sources**

Opis zadatka:

Tehnologije skladištenja energije poput toplinskih spremnika, reverzibilnih hidroelektrana, baterija, elektrolize i proizvodnje vodika i sl. su jedna od mogućih opcija za povezivanje energetskih sustava u budućnosti. Navedene tehnologije potrebno je usporediti u scenarijskoj analizi u računalnom programu EnergyPLAN, kako bi se na godišnjoj razini zadovoljilo 100% potreba za električnom energijom iz vjetroelektrana i solarnih fotonaponskih (PV) elektrana i 50% potreba za toplinskom i rashladnom energijom pomoću centraliziranih toplinskih i rashladnih sustava u Gradu Dubrovniku. Ostatak toplinskih i rashladnih potreba pokriven je dizalicama topline. Potrošnja energije odgovara potrošnji iz SEAP-a Grada Dubrovnika, a pretpostavljeno je da sva gradska naselja imaju mrežu za centralizirano grijanje i hlađenje. U radu je potrebno:

1. Napraviti pregled tehnologija za skladištenje toplinske, rashladne i električne energije i izračunati njihove specifične troškove.
2. Odrediti dimenzije i snagu potrebnih vjetroelektrana na Srđu, koje ne smiju biti vidljive iz Starog Grada, reverzibilne hidroelektrane, solarnih fotonaponskih panela, toplinskih solarnih kolektora, dizalica topline, baterija te toplinskog i rashladnog spremnika za zadovoljenje 100% energetskih potreba u sljedeća tri scenarija:
3. 100% obnovljivi Grad Dubrovnik uz skladištenje energije u reverzibilnoj hidroelektrani;
4. 100% obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje solarnih termalnih kolektora te centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava sa spremnicima toplinske i rashladne energije;
5. 100% obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje baterija za skladištenje električne energije.

U obzir uzimati prostorna ograničenja za instalaciju solarnih (PV i toplinskih) kolektora i vjetroelektrana. Rješenja pod 3., 4. i 5. optimizirati prema minimalnom godišnjem trošku sustava uključujući diskontirane investicijske troškove. Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | II |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | V |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Sustavi skladištenja energije | 1 |
| 1.2. Tehnologije skladištenja energije..... | 1 |
| 1.2.1. Skladištenje električne energije | 2 |
| 1.2.1.1. Mehaničko skladištenje energije..... | 3 |
| 1.2.1.1.1. Reverzibilne hidroelektrane | 3 |
| 1.2.1.1.2. Zamašnjaci | 4 |
| 1.2.1.1.3. Komprimirani zrak..... | 6 |
| 1.2.1.1.4. Skladištenje energije tekućim klipom | 8 |
| 1.2.1.1.5. Gravitacijsko skladištenje energije | 9 |
| 1.2.1.2. Skladištenje energije u sintetskim gorivima | 10 |
| 1.2.1.2.1. Vodik | 10 |
| 1.2.1.3. Elektrokemijsko skladištenje energije | 11 |
| 1.2.1.4. Električno skladištenje energije | 14 |
| 1.2.1.4.1. Skladištenje energije u superkondenzatorima..... | 14 |
| 1.2.1.4.2. Supravodljivo magnetno skladištenje energije | 14 |
| 1.2.2. Skladištenje toplinske i rashladne energije | 15 |
| 1.2.2.1. Skladištenja toplinske i rashladne energije u metalnom spremniku s vodom..... | 16 |
| 1.2.2.2. Skladištenje toplinske i rashladne energije u izoliranoj jami s vodom..... | 18 |
| 1.2.2.3. Geotermalno skladištenja toplinske i rashladne energije..... | 18 |
| 1.2.2.4. Skladištenja toplinske i rashladne energije u vodonosniku | 19 |
| 2. OPIS METODA I MODELA (METODOLOGIJA) | 21 |
| 2.1. Metodologija proračuna specifičnih troškova..... | 21 |
| 2.2. EnergyPLAN scenariji za Grad Dubrovnik | 21 |
| 2.3. Metodologija proračuna prostornih ograničenja | 24 |
| 2.3.1. Metodologija proračuna prostornih ograničenja za vjetroelektrane | 24 |
| 2.3.2. Metodologija izračuna prostornih ograničenja za fotonaponske module | 25 |
| 2.3.3. Metodologija izračuna prostornih ograničenja za solarne kolektore | 25 |
| 3. REZULTATI I DISKUSIJA..... | 27 |
| 3.1. Rezultati proračuna specifičnih troškova tehnologija skladištenja energije | 27 |
| 3.1.1. Proračun specifičnih troškova reverzibilne hidroelektrane..... | 27 |
| 3.1.2. Proračun specifičnih troškova natrij-sumpornih baterija..... | 29 |
| 3.1.3. Proračun specifičnih troškova litij-ionskih baterija | 30 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.1.4. | Proračun specifičnih troškova olovnih baterija..... | 30 |
| 3.1.5. | Proračun specifičnih troškova vanadij-redoks baterija | 31 |
| 3.1.6. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja energije s vodikom | 31 |
| 3.1.7. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u metalnom spremniku s vodom | 32 |
| 3.1.8. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u izoliranoj jami s vodom..... | 32 |
| 3.1.9. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u vodonosniku | 33 |
| 3.1.10. | Proračun specifičnih troškova sustava geotermalnog skladištenja toplinske energije..... | 33 |
| 3.1.11. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u metalnom spremniku s vodom | 34 |
| 3.1.12. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u izoliranoj jami s vodom | 34 |
| 3.1.13. | Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u vodonosniku | 34 |
| 3.1.14. | Proračun specifičnih troškova sustava geotermalnog skladištenja rashladne energije..... | 35 |
| 3.2. | Rezultati proračuna prostornih ograničenja | 35 |
| 3.2.1. | Prostorna ograničenja za vjetroelektranu | 35 |
| 3.2.2. | Prostorna ograničenja za fotonaponske module | 37 |
| 3.2.3. | Prostorna ograničenja za solarne kolektore | 38 |
| 3.3. | Scenariji pokrivanja energetske potrebe Grada Dubrovnika korištenjem obnovljivih izvora energije uz skladištenje energije | 39 |
| 3.3.1. | Distribucijske krivulje..... | 39 |
| 3.3.2. | Podaci investicijskih, varijabilnih i fiksnih troškova | 43 |
| 3.3.3. | Referentni scenarij za 2015. godinu..... | 43 |
| 3.3.4. | Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz skladištenje energije u reverzibilnoj hidroelektrani..... | 45 |
| 3.3.5. | Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje solarnih termalnih kolektora te centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava sa spremnicima toplinske i rashladne energije..... | 47 |
| 3.3.6. | Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje baterija za skladištenje električne energije | 49 |
| 4. | ZAKLJUČAK..... | 53 |
| | LITERATURA..... | 55 |
| | PRILOZI..... | 57 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Prikaz osnovne podjele tehnologija skladištenja energije; [2]..... | 2 |
| Slika 2. | Shematski prikaz reverzibilne hidroelektrane; [3]..... | 4 |
| Slika 3. | Shematski prikaz sustava skladištenja energije sa zamašnjakom; [6]..... | 6 |
| Slika 4. | Shematski prikaz sustava skladištenja energije komprimiranim zrakom; [8].... | 7 |
| Slika 5. | Shematski prikaz sustava skladištenja energije tekućim klipom; [8]..... | 8 |
| Slika 6. | Shematski prikaz natrij-sumporne baterije; [8]..... | 13 |
| Slika 7. | Toplinski akumulator TE-TO Zagreb; [17]..... | 17 |
| Slika 8. | Bušotinski izmjenjivač topline; [18]..... | 19 |
| Slika 9. | <i>EneryPLAN</i> model; [19]..... | 23 |
| Slika 10. | Mjesta u Starom Gradu koja su korištena kao lokacije promatrača; [27]..... | 36 |
| Slika 11. | Površina na kojoj je moguće izgraditi vjetroelektranu; [28]..... | 36 |
| Slika 12. | Mogući raspored vjetroagregata; [28]..... | 37 |
| Slika 13. | Površina na kojoj je moguća izgradnja toplinskih solarnih kolektora; [28]..... | 38 |
| Slika 14. | Distribucijska krivulja električnog opterećenja Grada Dubrovnika..... | 39 |
| Slika 15. | Distribucijska krivulja toplinskog opterećenja Grada Dubrovnika..... | 40 |
| Slika 16. | Distribucijska krivulja rashladnog opterećenja Grada Dubrovnika..... | 40 |
| Slika 17. | Distribucijska krivulja električne snage fotonaponskih panela za Grad Dubrovnik..... | 41 |
| Slika 18. | Distribucijska krivulja električne snage vjetroelektrana za Grad Dubrovnik.. | 41 |
| Slika 19. | Distribucijska krivulja specifičnog toplinskog učina solarnih kolektora za Grad Dubrovnik..... | 42 |
| Slika 20. | Distribucijska krivulja cijene električne prve godine rada CROPEXa 2016...42 | |

POPIS TABLICA

| | | |
|-------------|---|----|
| Tablica 1. | Usporedba relevantnih tehnologija skladištenja električne energije; [2]..... | 15 |
| Tablica 2. | Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 10 sati rada pri maksimalnom el. snagom turbine..... | 28 |
| Tablica 3. | Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 3 dana rada pri maksimalnom el. snagom turbine..... | 28 |
| Tablica 4. | Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 13 dana rada pri maksimalnom el. snagom turbine..... | 29 |
| Tablica 5. | Rezultati proračuna specifičnih troškova natrij-sumpornih baterija..... | 30 |
| Tablica 6. | Godišnja potrošnja finalne energije i godišnja količina prijeđenih kilometara u sektoru transporta referentnog scenarija za 2015. godinu..... | 44 |
| Tablica 7. | Varijabilni troškovi referentnog scenarija za 2015. godinu..... | 44 |
| Tablica 8. | Ukupni godišnji troškovi referentnog scenarija za 2015. godinu..... | 45 |
| Tablica 9. | Specifični troškovi proizvodnje energije iz vjetroelektrane i fotonaponskih modula..... | 46 |
| Tablica 10. | Troškovi scenarija s diskontnom stopom sustava 5 %..... | 50 |
| Tablica 11. | Troškovi scenarija s diskontnom stopom sustava 3 %..... | 52 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------|----------------------|---|
| α | [°] | kut između pravca, koji prolazi kroz oči promatrača i najviše točke brda između promatrača i vjetroatregata, i pravca horizontale |
| β | [°] | kut između pravca, koji prolazi kroz oči promatrača i vrha lopatica, i pravca horizontale |
| η_K | [%] | prosječna godišnja učinkovitost solarnih kolektora |
| η_P | [%] | učinkovitost skladištenja i pražnjenja sustava energijom |
| A_k | [m ²] | površina na koju je moguće instalirati toplinske solarne kolektore |
| A_{TD} | [m ²] | ukupna tlocrtna površina prizemlja svih kuća i zgrada u Gradu Dubrovniku |
| C | [EUR/MWh] | specifični trošak sustava po MWh |
| E_P | [MWh] | kapacitet skladištenja energije sustava |
| E_{UK} | [MWh] | maksimalno moguća toplinska energija koju je moguće dubiti u jednoj godini |
| FT | [EUR/god.] | fiksni pogonski troškovi i troškovi održavanja sustava |
| G_i | [MW/m ²] | globalno zračenje u određenom satu |
| IT | [EUR] | ukupni investicijski troškovi sustava |
| i | [%] | diskontna stopa |
| K_1 | — | koeficijent korekcije površine krovova prema udjelu krovova okrenutih prema južnoj strani |
| K_2 | — | koeficijent korekcije površine krovova prema iskoristivosti površine krovova za instalaciju fotonaponskih panela |
| K_3 | — | koeficijent korekcije površine na koju je moguće instalirati toplinske solarne kolektore zbog postojanja infrastrukture i strmih kosina na predviđenoj površini |
| L_B | [m] | zračna udaljenost između promatrača i najviše točke brda koja je između instaliranog vjetroatregata i promatrača |
| L_v | [m] | zračna udaljenost između promatrača i instaliranog vjetroatregata |
| N | [god.] | životni vijek sustava |
| n | — | broj ciklusa punjenja i pražnjenja sustava tijekom životnog vijeka |
| P_N | [MW] | maksimalna nazivna snaga pražnjenja sustava energijom |
| p_{PV} | [MW/m ²] | specifična nazivna snaga fotonaponskih modula |
| P_{UPV} | [MW] | maksimalna nazivna snaga svih instaliranih fotonaponskih modula |
| ST_P | [MEUR/MW] | specifični trošak sustava po MW |
| VT | [EUR/god.] | varijabilni pogonski troškovi i troškovi održavanja sustava |
| X_p | [%] | dubina pražnjenja sustava energijom |

| | | |
|-------|-----|--|
| Z_B | [m] | nadmorska visina najviše točke brda koja je između mjesta instaliranog vjetroagregata i promatrača |
| Z_G | [m] | nadmorska visina promatrača |

SAŽETAK

U ovom radu napravljena je scenarijska analiza Grada Dubrovnika u EnergyPLAN računalnom programu tako da je energetska sustav 100 % obnovljiv uz korištenje sustava skladištenja energije. Kao izvori energije korišteni su fotonaponski moduli, solarni termalni kolektori te vjetroelektrana za koju su u obzir uzeta prostorna ograničenja. Razrađeno je 8 scenarija uključujući i referentni koji je razrađen za 2015. godinu. Scenariji su međusobno uspoređeni i pokazano je kako samodostatni sustav s baterijama ima najveće ukupne godišnje troškove zbog jako visokih investicijskih troškova te zbog potreba sustava za velikim kapacitetom skladištenja energije. Pokazalo se također da je sustav s najmanjim ukupnim godišnjim troškovima onaj koji može uvoziti električnu energiju, ali bez skladištenja energije, to je zato jer je korištena unaprijed zadana distribucijska krivulja cijena električne energije bez elastičnosti cijene. Pokazan je i utjecaj korištene diskontne stope na isplativost sustava gdje samodostatni sustav s reverzibilnom hidroelektranom uz diskontnu stopu od 5 % ima veće ukupne godišnje troškove od referentnog sustava, dok uz korištenje diskontne stope od 3 % u oba sustava ukupni godišnji troškovi sustava s reverzibilnom hidroelektranom su manji od onih koji se javljaju u referentnom sustavu. Napravljena je analiza i proračun specifičnih troškova tehnologija skladištenja električne, toplinske i rashladne energije pri čemu je naglasak stavljen na tehnologije skladištenja energije velikih razmjera.

Ključne riječi: Skladištenje električne energije, Skladištenje toplinske energije, Skladištenje rashladne energije, Fotonaponski moduli, Vjetroelektrana, Energija, Ukupni godišnji troškovi, *EnergyPLAN*.

SUMMARY

This paper analyses the city of Dubrovnik in the EnergyPLAN computer program so that the energy system is 100% renewable with the use of energy storage systems. Photovoltaic modules, solar thermal collectors and wind power plants were used as sources of energy for which space constraints were taken into account. 8 scenarios have been elaborated including a reference model that was designed for the year 2015. The scenarios have been compared to each other and it has been shown that scenario without import of electricity and with battery system has the highest total annual cost due to very high investment costs and the need for a large storage capacity system. It has also been shown that the system with the lowest total annual cost is the one that can import electricity but without using energy storage, this is because a predetermined distribution curve of the electricity price was used without price elasticity. It was also shown how discounted rate can influence cost-effectiveness of the system. The system with the disabled import of electricity, which is using a reversible hydroelectric power plant has a higher total annual cost than the reference system with a discount rate of 5%. Using in both systems the discount rate of 3% the total annual costs of the reversible hydroelectric system are smaller than those appearing in the reference system. An analysis and calculation of the specific costs of electrical storage technologies, heat and cold energy storage technologies have been made with emphasis placed on large-scale energy storage technologies.

Key words: Electricity storage, Heat energy storage, Cold energy storage, Photovoltaic modules, Wind power, Energy, Total annual costs, *EnergyPLAN*.

1. UVOD

Nesigurnost opskrbe europskog tržišta konvencionalnim energentima poput prirodnog plina i nafte, te sve veća svjesnost na njihov negativni utjecaj na okoliš, doveli su do učestalijeg korištenja čistih, obnovljivih izvora energije u sustavima opskrbe energijom. Jedan od problema veće implementacije obnovljivih izvora energije u sustavima opskrbe energijom je varijabilnost njihove dostupnosti tijekom dana (npr. sunčevog zračenja nema noću), mjeseca (npr. nepredvidiva priroda vjetera) i godišnjih doba (npr. nakon otapanja snijega na slivnom području rijeka na kojima postoje protočne hidroelektrane, javlja se mogućnost intenzivnije eksploatacije hidropotencijala zbog mogućeg većeg protoka vode kroz turbinu hidroelektrane). Još jedan od problema je varijabilnost potrošnje energije. Naime potrošnja energije, nije konstantna tijekom dana, tjedna, godišnjih doba, nego ovisi o aktivnosti ljudi, vremenskim prilikama itd. Nepodudarnost proizvodnje energije iz obnovljivih izvora i potrošnje energije sa strane potrošača zahtijeva sustave koji bi se nalazili između sustava proizvodnje i potrošnje energije, kako bi se sav potencijal mogao iskoristiti u potpunosti, te omogućila veća penetracija obnovljivih izvora energije u sustavima opskrbe energijom. Te sustave zovemo sustavima skladištenja energije.

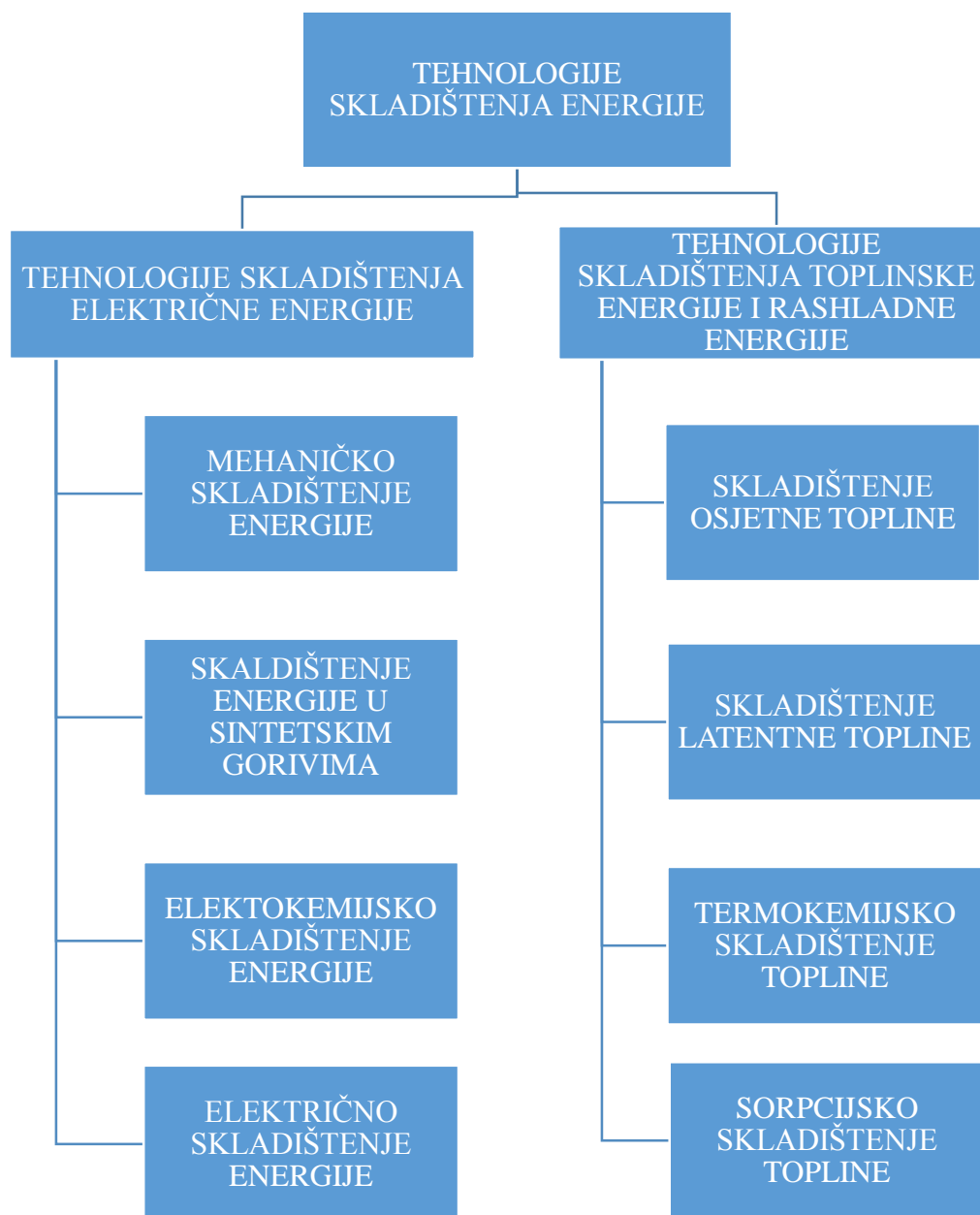
1.1. Sustavi skladištenja energije

Sustavi skladištenja energije su instalacije čija je uloga zaprimanje energije iz sustava proizvodnje energije, pretvorba energije u oblik pogodan za skladištenje, skladištenje energije na neko vrijeme te pretvorba energije u oblik prihvatljiv potrošačima s minimalnim gubicima energije u cijelom procesu skladištenja i pretvorbe energije; [1].

1.2. Tehnologije skladištenja energije

Tehnologije skladištenja energije su skup različitih izvedbi sustava skladištenja energije. Mogu se podijeliti po vrsti energije koja se koristi u primjeni. Dakle, možemo ih podijeliti na tehnologije skladištenja električne energije i na tehnologije skladištenja toplinske i rashladne energije. Svaku od njih ćemo podijeliti kako je pokazano na slici [Slika 1.]. Skladištenje električne energije možemo podijeliti na: mehaničko skladištenje energije, skladištenje energije u sintetskim gorivima, elektrokemijsko skladištenje energije, super kondenzatorsko magnetno

skladištenje energije. Toplinsko skladištenje energije možemo podijeliti na: skladištenje osjetne topline, skladištenje latentne topline i na termokemijsko skladištenje topline; [1].



Slika 1. Prikaz osnovne podjele tehnologija skladištenja energije; [2]

1.2.1. Skladištenje električne energije

Električna energija sama po sebi predstavlja vrlo kvalitetan oblik energije koji se s lakoćom može transportirati na velike udaljenosti s relativno malim gubicima, ali nažalost nije ju moguće skladištiti bez pretvorbe u neki stabilniji oblik. Osim što sustavi skladištenja električne energije omogućuju poravnavanje razlika između proizvodnje i potrošnje električne energije, oni pomažu održavanju stabilnosti električne mreže te održavanju stabilne frekvencije električne

struje u mreži; [2]. Također omogućuju termoelektranama i nuklearnim elektranama da rade s maksimalnim stupnjem iskoristivosti, tj. uklanja potrebu takvih postrojenja da rade na maksimalnom opterećenju čime dolazi do uštede goriva.

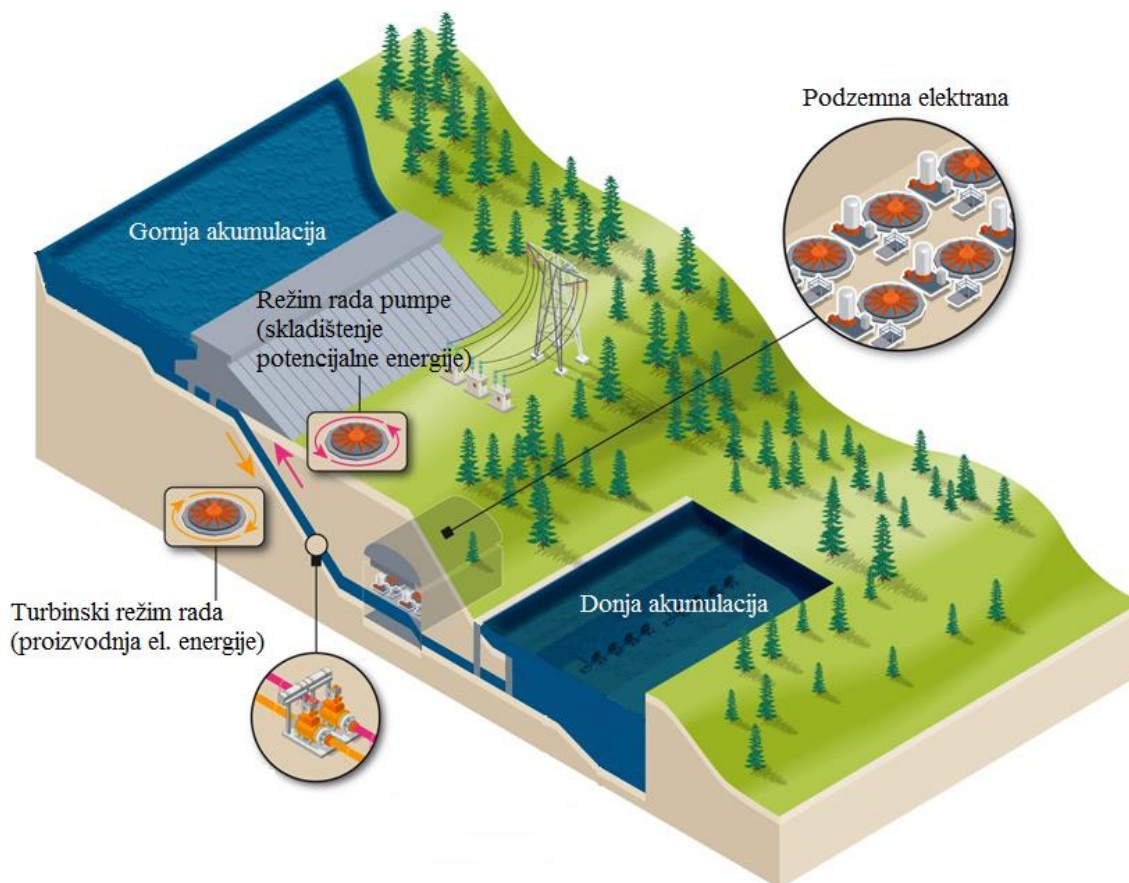
1.2.1.1. Mehaničko skladištenje energije

Mehaničko skladištenje energije podrazumijeva skladištenje električne energije u kinetičkoj, potencijalnoj energiji ili njeno skladištenje u komprimiranom plinu i naprezanju materijala. Neke od tehnologija koje koriste mehaničko skladištenje energije su:

- reverzibilne hidroelektrane,
- zamašnjaci,
- komprimirani zrak,
- skladištenje energije tekućim klipom,
- gravitacijsko skladištenje energije.

1.2.1.1.1. Reverzibilne hidroelektrane

Reverzibilne hidroelektrane su najrasprostranjenija i najstarija tehnologija skladištenja energije velikih razmjera. Služe skladištenju potencijalne energije vode u spremniku. Ovakve hidroelektrane imaju dvije akumulacije vode za razliku od konvencionalnih akumulacijskih hidroelektrana koje imaju jednu akumulaciju. Akumulacije reverzibilnih hidroelektrana su puno manje po volumenu od akumulacija konvencionalnih akumulacijskih hidroelektrana. Dvije akumulacije (gornja i donja) su povezane cjevovodom (s jednim ili više njih). Na dijelu cjevovoda koji se nalazi na nešto nižoj nadmorskoj visini od donje akumulacije nalaze se vodena turbina i pumpa, koje mogu biti odvojene ili mogu biti objedinjene u reverzibilnoj turbini (obično Francisov tip turbine). Reverzibilna turbina se može ponašati kao vodena turbina i kao vodena pumpa, ovisno o potrebnom režimu rada postrojenja. Reverzibilne hidroelektrane funkcioniraju tako da, kada u sustavu opskrbe električnom energijom postoje viškovi električne energije tj. kad je potražnja najmanja, elektromotor pogoni pumpu, trošeći električnu energiju iz mreže, koja pumpa vodu iz niže akumulacije u višu akumulaciju. Kada električne energije nedostaje, tj. kada je potražnja najveća voda se pušta iz više akumulacije u nižu, tako da voda prolazi kroz vodenu turbinu koja je spojena na električni generator i tako proizvodi električnu energiju.



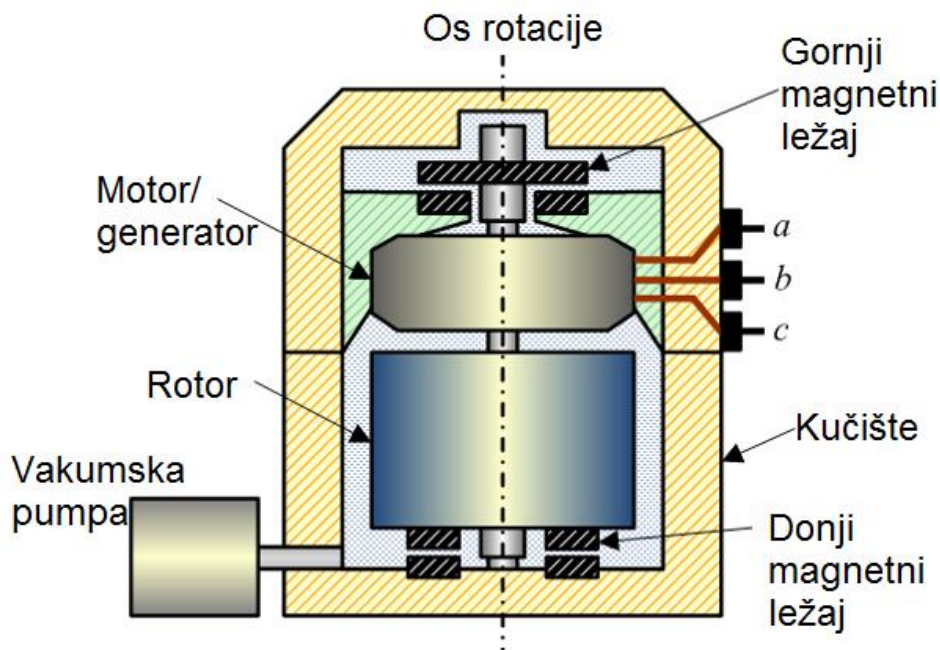
Slika 2. Shematski prikaz reverzibilne hidroelektrane; [3]

Ova sposobnost generiranja električne energije i skladištenja u obliku potencijalne energije omogućava poravnavanje razlike u opterećenju električne mreže, te omogućava maksimalno iskorištavanje potencijala energije vjetra i sunca. Isplativost ovakvih sustava najviše ovisi o geografskim karakteristikama predviđene lokacije za izgradnju ovakvog sustava, tj. o investicijskim troškovima postrojenja. Naime, za postizanje dovoljno velikih snaga na dulji vremenski period potrebna je adekvatna visinska razlika, dovoljno velik protok na turbine i potrebno je osigurati dovoljno velike akumulacije vode. Investicijski troškovi se mogu smanjiti odabirom lokacija koje imaju prirodne predispozicije. Ovakva pohrana energije nije idealna, zato jer postoje gubici u transformaciji energije na turbine, električnom generatoru, pumpi, elektromotoru, te linijski gubici u cjevovodima. Reverzibilne hidroelektrane danas posjeduju iskoristivost energije od 65 %; 87 %; [4]; [5].

1.2.1.1.2. Zamašnjaci

Zamašnjaci se koriste već stoljećima kao sredstvo održavanja kontinuirane rotacije ublažavanjem udarnih opterećenja u lončarskim kolima, od industrijske revolucije u parnim

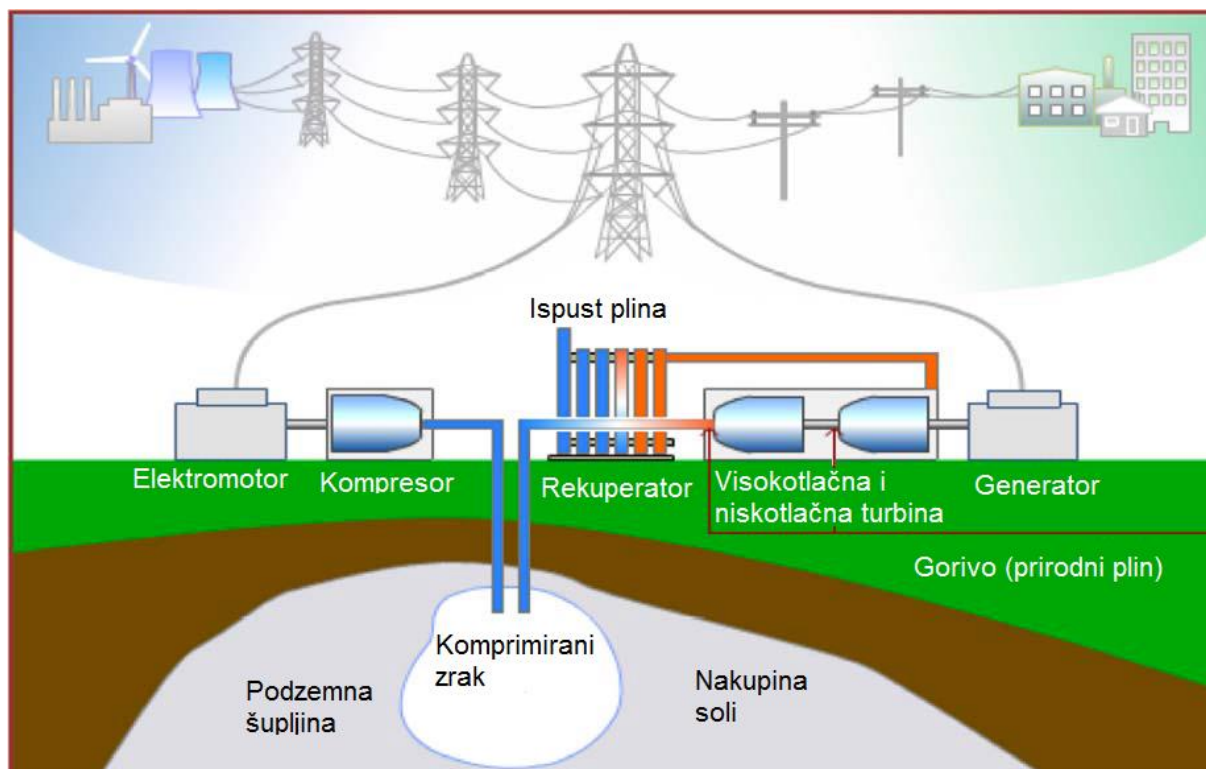
strojevima i vozilima. Danas se vrlo često koriste u sustavima opskrbe električnom energijom kao sredstvo podizanja kvalitete električne energije poništavanjem distorzija u izmjeničnoj struji, te kao spremnici energije sposobni predati ogromne količine energije u kratko vrijeme magnetima za nuklearne akceleratori čestica, također imaju primjenu u bolnicama i sličnim ustanovama gdje u slučajevima nestanka električne energije mogu biti korišteni kao izvor akumulirane energije dovoljno dugo dok se ne uključe električni dizelski generatori. Koriste se u električnim vozilima za regenerativno kočenje. Pohrana energije u zamašnjacima je oblik pohrane električne energije u oblik kinetičke energije u rotacijskom gibanju mase oko osi. Sustavi skladištenja energije sa zamašnjakom sadrže u sebi zamašnjak povezan vratilom s elektromotorom, koji je ujedno i generator u hermetički zatvorenom kućištu, te ležajeve. Prilikom akumulacije energije elektromotor trošenjem električne energije ubrzava zamašnjak. Prilikom pražnjenja akumulirane kinetičke energije rotacija zamašnjaka se usporava, te generator proizvodi električnu struju. Da bi se minimalizirali gubici koriste se magnetni ležajevi kako bi se spriječilo stvaranje trenja na dodirnim točkama koje bi imali klasični ležajevi. Također, minimiziranje gubitaka trenja rotirajuće mase u dodiru sa zrakom ostvaruje se korištenjem hermetički zatvorenog kućišta u kojem se ostvaruje vakuum. U konstrukciji zamašnjaka koriste se kompozitni materijali (kevlar/epoksidna smola, karbonska vlakna/epoksidna smola) koji imaju visoku vlačnu čvrstoću i malu gustoću, kako bi mogli podnijeti visoka tangencijalna naprezanja prilikom gibanja velikom kutnom brzinom. Sustavi sa zamašnjacima veće mase sposobni su skladištiti veće količine energije, pri relativno malom broju okretaja (do 10 000 okretaja u minuti), ali nisu sposobni skladištiti tu energiju na duži vremenski period. Sustavi sa zamašnjacima manje mase su sposobni skladištiti manju količinu energije od sustava sa zamašnjacima veće mase, ali na duži vremenski period pri većem broju okretaja (višim od 10 000 okretaja po minuti). Učinkovitost ovakvih sustava ovisi o vremenu skladištenja energije. Primjer: zamašnjak s rotorom teškim 200 tona, ima učinkovitost 85 % nakon punjenja, 78 % nakon skladištenja energije 5 sati, i 45 % nakon cjelodnevnog skladištenja energije; [1]; [2].



Slika 3. Shematski prikaz sustava skladištenja energije sa zamašnjakom; [6]

1.2.1.1.3. Komprimirani zrak

O skladištenju energije u komprimiranom zraku počelo se razmišljati još u četrdesetim godinama dvadesetog stoljeća, ali do danas nije bilo mnogo izvedbi te tehnologije. Druga je nakon reverzibilnih hidroelektrana po razmjerima energije koju je moguće skladištiti. Zrak je moguće komprimirati kompresorima u podzemne špilje, napuštene rudnike, podzemne nakupine soli, iskorištena naftna i plinska polja ili pak u cijevi i posude, koristeći viškove električne energije iz električne mreže. Tijekom najveće potražnje električne energije taj stlačeni zrak se može zagrijati izgaranjem plina u komori izgaranja, te iskoristiti u plinskoj turbini spojenoj na generator kako bi se proizvela električna energija. Dakle razlika u odnosu na konvencionalni plinski blok je u tome što sam kompresor nije povezan vratilom direktno s turbinom, već s elektromotorom koji je napajan iz mreže, to znači da je za određenu količinu prirodnog plina u ovakvom postrojenju moguće dobiti tri puta više energije u odnosu na konvencionalni plinski blok, jer se više ne troše dvije trećine energije dobivene ekspanzijom plina na kompresiju.

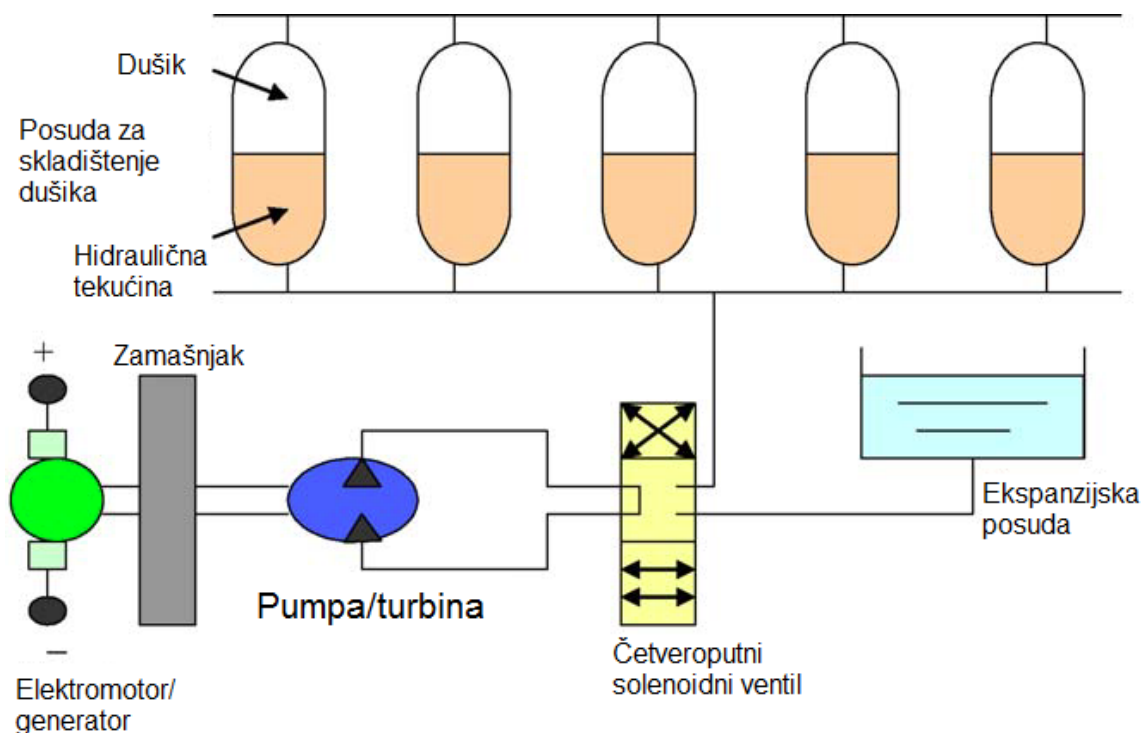


Slika 4. Shematski prikaz sustava skladištenja energije komprimiranim zrakom; [8]

Moguća učinkovitost sustava je oko 70 %, s tim da se ona može povećati tako da se toplina iz komprimiranog zraka prije skladištenja rekuperira sa zrakom prije ulaska u komoru izgaranja. Zrak je moguće skladištiti s promjenjivim tlakom u skladišnom prostoru, tako da tlak ovisi o popunjenosti skladišnog prostora ili s konstantnim tlakom u skladišnom prostoru, tako da se konstantan tlak osigurava protusilom, najčešće stupcem vode. Da bi ovakva postrojenja bila isplativa potrebne su dakle prirodne šupljine u podzemlju lokacije na kojoj bi se gradilo postrojenje, te jeftin izvor električne energije na mreži. Pošto je potrebno izgaranje prirodnog plina radi zagrijavanja zraka, ova tehnologija nije ekološki u potpunosti prihvatljiva zbog emisije ugljičnog dioksida; [1]; [2]; [5]. Osim prirodnog plina moguće je koristiti sintetska goriva poput vodika. Ova tehnologija se ne može smatrati samo tehnologijom skladištenja energije, već kombinacijom tehnologija proizvodnje i skladištenja energije; [1]. U razvoju je tehnologija koja ne bi koristila prirodni plin za zagrijavanje zraka, već bi skladištila toplinu u toplinskom spremniku iz komprimiranog zraka, te ju kasnije iskoristila za zagrijavanje zraka prije ulaska u plinsku turbinu, ovakav sustav ne bi imao emisija ugljičnog dioksida; [7].

1.2.1.1.4. Skladištenje energije tekućim klipom

Tehnologija skladištenja energije tekućim klipom je relativno mlada tehnologija čija se primjena uspoređuje s primjenom olovnih baterija u obrtničkim radnjama i industriji. Pohrana energije se odvija slično kao u tehnologiji skladištenja energije u komprimiranom zraku, u plinu koji ne mora nužno biti zrak, češće samo dušik, koji se nalazi u posudama pod tlakom zajedno s hidrauličkom tekućinom.



Slika 5. Shematski prikaz sustava skladištenja energije tekućim klipom; [8]

Punjenje sustava energijom se odvija pokretanjem pumpe (koja je ujedno i turbina) pomoću elektromotora koja stlačivanjem hidrauličke tekućine komprimira plin u posudama. Pražnjenje sustava se odvija pražnjenjem posuda hidrauličkom tekućinom, ekspanzijom plina, čime se pokreće pumpa u režimu turbine, koja pokreće električni generator. Sustav također sadrži ekspanzijsku posudu koja se puni prilikom ekspanzije plina, zamašnjak, te solenoidni četveroputni ventil čija je uloga održavanje niskog broja okretaja elektromotora, tj. električnog generatora; [8]. Procesi ekspanzije i kompresije odvijaju se vrlo sporo, gotovo izotermno. Tlak u posudama je određen količinom hidrauličke tekućine u posudama (100 do 200 bara); [1]. U odnosu na olovne baterije ova tehnologija nema problema prilikom potpunog energetskog pražnjenja, te ima duži životni vijek, broj punjenja i pražnjenja kroz eksploataciju sustava ne

utječe na njegovu učinkovitost ni na kapacitet punjenja, kao ni njegova starost, sustav je osiguran od prepunjenosti sigurnosnim ventilima, pražnjenje sustava energijom dok je on u stanju skladištenja je gotovo zanemarivo, održavanje sustava je jeftinije i jednostavnije; [8]. Neke mane u odnosu na olovne baterije su: mogućnost propuštanja hidrauličkih i pneumatskih cjevovoda, manja gustoća energije u odnosu na olovne baterije, te nešto niža učinkovitost koja je oko 78 %; [8].

1.2.1.1.5. Gravitacijsko skladištenje energije

Tehnologije gravitacijskog skladištenja energije su skup tehnologija koje koriste gravitacijski potencijal mase kao sredstvo skladištenja energije. Reverzibilne hidroelektrane su obrađene odvojeno od njih u ovom radu zbog njihove zrelosti i rasprostranjenosti u odnosu na ostale tehnologije gravitacijskog skladištenja energije koje su tek u povojima. Već ranije spomenuta jedna od mana reverzibilnih hidroelektrana je potreba za velikim količinama vode u vodenim akumulacijama. Tvrtke *Gravity Power*, *Energy Cache* i *Advanced Rail Energy Storage* pronašle su način kako da se ta stalna potreba za vodom smanji ili u potpunosti ukine.

Tvrtka *Gravity Power* je osmislila sustav koji sadrži u sebi masivni cilindar potopljen vodom u dubokoj jami u zatvorenom, povezanom sustavu. Vrh i dno jame su povezani tunelom, s tim da je na vrhu pumpa koja služi i kao turbina koja pokreće električni generator. Cilindar na sebi nosi brtve koje imaju ulogu spriječiti prodor vode s druge strane cilindra. Dok postoje viškovi električne energije pumpa radi i svojim radom podiže tlak u tunelu ispod utega, te samim time diže uteg, dok je potražna električne energije na vrhuncu pumpa više ne diže tlak, već iskorištava strujanje koje stvara gibanje klipa prema dolje pod utjecajem gravitacije, te radeći u režimu turbine pokreće generator. Ovakav sustav bi, za razliku od reverzibilnih hidroelektrana, trebalo napuniti vodom samo jednom. Navodno bi nakon izgradnje imao učinkovitost preko 80 %; [9].

Tvrtka *Energy Cache* je osmislila sustav koji bi dizao šljunak u posudama na uzvisinu za vrijeme viškova proizvedene električne energije, a za vrijeme najveće potražnje spuštao nazad na podnožje brda ili planine; [10].

Tehnologija tvrtke *Advanced Rail Energy Storage* funkcionira na sličan način kao tehnologija sa šljunkom, samo što umjesto šljunka podže betonske ploče koje klize po tračnicama prema uzvisini ili nizbrdici ovisno o potrebi za energijom s navodnom učinkovitošću 80 %; [11]. Ove tehnologije zahtijevaju geografski povoljna područja s uzbrdicama.

1.2.1.2. Skladištenje energije u sintetskim gorivima

Tehnologije skladištenja energije u sintetskim gorivima su tehnologije koje korištenjem topline ili električne energije sintetiziraju kemijske produkte kao nositelje energije. Dakle energija je skladištena u kemijskim vezama samih tvari. Sintetska goriva u pogledu korištenja viškova električne energije su zanimljiva zato jer imaju visoku energetska gustoću u odnosu na druge tehnologije skladištenja energije, međutim njihova velika mana je što sami ciklusi skladištenja i iskorištavanja energije imaju nisku učinkovitost. Neka od goriva koja je moguće sintetizirati su:

- razni ugljikovodici,
- metanol,
- etanol,
- butanol,
- vodik.

Ovdje je zasigurno najperspektivniji vodik, koji je u odnosu na druga goriva moguće puno jednostavnije i učinkovitije sintetizirati korištenjem električne energije elektrolizom vode, a i sam je potreban za sintezu ostalih ovdje navedenih. Ugljikovodici se dobivaju korištenjem električne energije *Fischer-Tropschovom* sintezom iz ugljičnog monoksida ili dioksida u kombinaciji s vodikom. Metanol i butanol je puno lakše dobiti destilacijom biomase; [12]. U ovom radu će se govoriti samo o vodik.

1.2.1.2.1. Vodik

Vodik kao najmanja molekula na Zemlji ne postoji u svom elementarnom obliku, već je vezana s drugim elementima kao na primjer: s kisikom u vodi, s ugljikom u ugljikovodicima itd. Kao što je i ranije rečeno vodik je danas najlakše dobiti elektrolizom vode.

Elektroliza je elektrokemijski proces u kojem se voda u koju su uronjene pozitivno i negativno nabijene elektrode (anoda i katoda), razlaže na vodik i kisik protjecanjem električne struje kroz vodu pod utjecajem vanjskog napona. Sam proces je endoterman, što znači da mu je potrebna i topline. Učinkovitost elektrolize je oko 60 %; [1].

Vodik je moguće fizički skladištiti na više načina. Jedan od načina je da se vodik stlači u boce do tlakova od 900 bara, te da bude u plinovitom agregatnom stanju, moguće ga je stlačiti i u podzemnim špiljama slično kao i kod tehnologije skladištenja energije u stlačenom zraku do 200 bara; [13]. Još jedna od tehnologija skladištenja vodika je u tekućem agregatnom stanju na

temperaturi $-252,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri okolišnom tlaku, tu se javlja potrošnja električne energije za hlađenje, te potreba za izolacijom. Osim što se vodik može vezati u spojevima s ugljikom, moguće ga je vezati u metalnim prašcima, tako da tvori metal-hidride. Metal-hidride napunjene s vodikom karakterizira jednoliko otpuštanje vodika pri relativno konstantnim tlakom. Skladištenju vodika definitivno ne ide u korist to što je vodik najmanja molekula, pa kada je skladišten u plinovitom agregatnom stanju ili u metalnim hidridima postoji propuštanje vodika na ventilima.

Vodik je moguće iskoristiti direktno paljenjem u komorama izgaranja plinskih postrojenja ili u gorivnim člancima. Gorivni članci su tehnologija koja nalikuje električnim baterijama, samo što umjesto elektrolita, kada govorimo o vodik, koristi vodik i kisik (može koristiti i spojeve s vodikom u kombinaciji s nekim oksidacijskim spojevima). Gorivni članak funkcionira tako da dovodenjem vodika na polupropusnu membranu ili elektrolit (koji provodi samo protone), katoda oduzima elektrone molekulama vodika, te one postaju protoni i pod utjecajem razlike tlaka i elektrostatskih sila prolaze kroz membranu. U isto vrijeme elektroni prolaze kroz vodič i trošilo s opterećenjem te stvaraju protok elektrona, čiji put završava reakcijom s kisikom i protonom stvarajući vodenu paru. Dakle gorivni članci trošenjem vodika i kisika iz zraka stvaraju toplinu, vodu i istosmjerni napon i to od oko 0,7 volti. Gorivne članke je potrebno slagati u serijski spojene svežnje, kako bi se dobio potreban napon. Za potrebe električne mreže potrebno je koristiti invertore radi pretvorbe istosmjerne u izmjeničnu električnu struju. Gorivni članci danas se koriste u velikom broju viličara u Sjedinjenim Američkim Državama, te bi mogli u budućnosti imati svoju ulogu u prometu. Iskoristivost samog ciklusa od proizvodnje vodika do iskorištavanja u gorivnim člancima je oko 30 %, dok bi izgaranjem u plinskim energetskeim blokovima bila nešto viša uz uvjetno korištenje kogeneracije; [2].

1.2.1.3. Elektrokemijsko skladištenje energije

U tehnologije elektrokemijskog skladištenja energije spadaju one tehnologije koje skladište električnu energiju u kemijskom obliku unutar samog uređaja. Ti uređaji su razne vrste baterija koje se sastoje od baterijskih članaka, čiji su osnovni dijelovi:

- elektrolit,
- anoda,
- katoda.

Prilikom skladištenja energije odvijaju se elektrokemijske reakcije koje pod utjecajem vanjskog napona omogućuju prebacivanje elektrona s katode na anodu kroz elektrolit, prilikom pražnjenja prisutnost vanjskog opterećenja omogućuje suprotan proces.

Baterije mogu biti:

- s krutim elektrodama i tekućim elektrolitom (npr.: olovne, litij-ionske, nikal-kadmij, nikal-metal-hidridne baterije),
- s rastaljenim elektrodama i s krutim elektrolitom (npr.: natrij-sumporne, natrij-nikal-kloridne baterije),
- protočne baterije s dva odvojena tekuća elektrolita (npr.: cink-brom, natrij-brom, vanadij redoks baterije); [14].

Jedna od prednosti baterija je visoka učinkovitost ciklusa pohrane i pražnjenja energijom, što je uvjetovano činjenicom da se električna energija direktno pohranjuje u elektrolitu bez posredovanja pomičnih dijelova (osim kod protočnih baterija koje imaju pumpe). Kada je energija potrebna ona se direktno pretvara iz elektrokemijske u električnu. Ako bi baterije bile priključene na izmjeničnu električnu mrežu potrebna bi bila transformacija istosmjerne struje iz baterije u izmjeničnu uz pomoć invertera, te pretvorba iz izmjenične u istosmjernu struju uz pomoć ispravljača prilikom punjenja baterije. Mana svih baterija je korištenje kemikalija štetnih za okoliš i visoki investicijski troškovi.

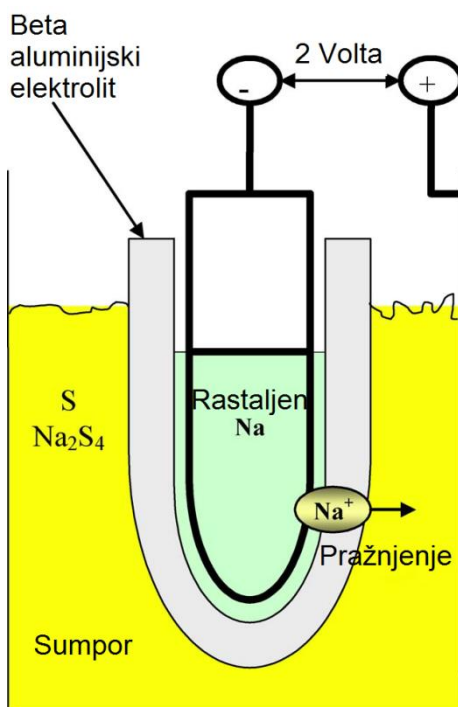
Olovne baterije su najstarija i najšire korištena vrsta baterija. Koriste se još i danas (npr. u vozilima), zbog svoje cijene koja je uvjetovana masivnosti proizvodnje i zrelosti tehnologije, brzog odziva, pouzdanosti. Elektrolit je sumporna kiselina, dok su katoda od olova, te anoda od olovnog dioksida. Jedan članak u olovnim baterijama razvija napon od 2 volta. Učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja je od 80 % do 90 %, životni vijek je od 8 do 15 godina, uz 1500 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom, dubina pražnjenja je 80 %, gustoća energije oko 50 Wh/kg, dok gustoća snage oko 150 W/kg; [2], [5], [13].

Litij-ionske baterije se danas najviše koriste u prijenosnim uređajima poput mobilnih telefona, prijenosnih računala itd. Zbog veće gustoće energijom i kompaktnosti u odnosu na ostale baterije nalaze sve veću primjenu u električnim vozilima. Karakteristično je korištenje litijevih spojeva na mjestu anode. Razvijaju veći napon po članku od ostalih baterija, koji je preko 3,7 volti. Zahtijevaju posebne elektroničke komponente za osiguranje od prepunjenosti. Učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja je od 85 % do 98 %, gustoća energije je od 90 do

190 Wh/kg, gustoća snage od 500 do 2000 W/kg, uz 5000 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom; [2], [12], [13].

Vanadij-redoks baterije su protočne baterije, što znači da koriste pozitivno nabijen elektrolit nazvan anolit i negativno nabijen elektrolit nazvan katolit koji struje pogonjeni pumpama kroz regenerativni gorivni članak, gdje elektrokemijski reagiraju, te stvaraju razliku električnog potencijala tj. napon. Katolit i anolit su skladišteni u spremnicima i sve dok nisu u međusobnom dodiru regenerativnom gorivnom članku ne dolazi do pražnjenja baterije. Vanadij-redoks baterije kao anolit i katolit koriste različite ione vanadija. Toleriraju prepunjenost, relativno se jeftino održavaju, moguće je brzo punjenje zamjenom elektrolita u spremnicima. Imaju relativno nisku gustoću energije od 10 do 30 Wh/kg, životni vijek im je od 5 do 10 godina s više od 12000 ciklusa punjenja i pražnjenja s učinkovitošću od 65 % do 85 %; [2], [13], [14].

U natrij-sumpornim baterijama pozitivno nabijen rastaljeni sumpor služi kao katoda, a negativno nabijeni rastaljeni natrij služi kao anoda, elektrode su međusobno odvojene beta aluminijskim krutim elektrolitom. Rade pri visokim temperaturama od 300 °C do 350 °C kako bi elektrode bile rastaljene. Potrebni su sustavi za održavanje temperature, koji su napajani energijom iz same baterije. Učinkovitost ciklusa punjenja i pražnjenja je od 75 % do 85 %, gustoća energije je relativno visoka od 150 do 240 Wh/kg, gustoća snage je 150 do 230 W/kg, životni vijek je 10 do 15 godina s oko 2500 ciklusa punjenja i pražnjenja; [2], [13].



Slika 6. Shematski prikaz natrij-sumporne baterije; [8]

1.2.1.4. Električno skladištenje energije

Električno skladištenje energije podrazumijeva skladištenje energije u električnom i elektromagnetnom polju. Tehnologije koje predstavljaju navedene principe su:

- skladištenje energije u ultrakondenzatorima,
- supravodljivo magnetno skladištenje energije.

1.2.1.4.1. Skladištenje energije u superkondenzatorima

Superkondenzatori ili ultrakondenzatori poput klasičnih električnih kondenzatora skladište energiju nakupljanjem naboja na elektrodama različitog naboja. Maksimalan kapacitet kondenzatora je proporcionalan samoj površini elektroda, te suprotno proporcionalan njihovoj udaljenosti jedne od druge. Dakle u odnosu na klasične kondenzatore superkondenzatori imaju puno veće površine elektroda, što omogućavaju porozni materijali poput grafita, te udaljenosti između elektroda su puno manje, reda veličine jedan nanometar, zahvaljujući tankoj izolaciji elektroda, što uzrokuje daleko veće kapacitete superkondenzatora u odnosu na obične. Superkondenzatore karakterizira sposobnost brzog punjenja i pražnjenja energijom, te mogućnost reakcije na potražnju energije u milisekundama. Učinkovitost samog sustava je od 85 % do 95 %. Tijekom životnog vijeka moguć je gotovo beskonačan broj ciklusa punjenja i pražnjenja energijom. U odnosu na baterije gustoća energije im je jako mala svega 5 Wh/kg. Sposobni su davati veliku snagu mreži, ali na vrlo kratko vrijeme. Tehnologija je još vrlo mlada, te su investicijski troškovi relativno veliki u odnosu na ostale tehnologije; [2]; [8]; [13].

1.2.1.4.2. Supravodljivo magnetno skladištenje energije

Moguće je skladištiti električnu energiju u magnetnom polju kriogeno ohlađene magnetne zavojnice, čija temperatura mora biti spuštena ispod kritične temperature što se tiče provodljivosti električne struje materijala. Kritična temperatura supravodljivosti je ona ispod koje nema otpora strujanju električne struje kroz materijal, dakle poželjno je da se koriste oni materijali kod kojih je ta temperatura čim viša kako bi gubici energije potrošeni na hlađenje zavojnice bili što manji. Današnji materijali postižu kritičnu temperaturu na oko -173 °C. Sustav radi s izmjeničnom električnom strujom, čija jačina raste prilikom punjenja, a pada prilikom pražnjenja energijom. Poput superkondenzatora ovakvi sustavi mogu veliku količinu energije ispustiti u sustav opskrbe električnom energijom u jako malom vremenskom periodu. Mogu dugo skladištiti energiju, ali učinkovitost skladištenja opada s vremenom u kojem je energija skladištena zbog potrošnje energije na hlađenje; [2], [13].

Tablica 1. Usporedba relevantnih tehnologija skladištenja električne energije; [2]

| Tehnologija | Uobičajene snage | Uobičajeno vrijeme pražnjenja energijom | Vrijeme skladištenja energije | Učinkovitost (%) |
|----------------------------------|------------------|---|-------------------------------|------------------|
| Reverzibilna hidroelektrana | 100-5000 MW | 1-24+ h | h-mjeseci | 65-87 |
| Komprimirani zrak | 5-300 MW | 1-24+ h | h-mjeseci | 50-89 |
| Zamašnjak | 0-250 kW | ms-15 min | s-min | 85-95 |
| Vodikovi gorivni članci | 0-50 MW | s-24+ h | h-mjeseci | 25-35 |
| Natrij-sumporne baterije | 50 kW-8 MW | s-h | s-h | 75-95 |
| Litij-ionske baterije | 0-100 kW | min-h | min-dani | 85-98 |
| Olovne baterije | 0-100 kW | s-10 h | h-mjeseci | 85-90 |
| Vanadij-redoks baterije | 30 kW-3 MW | s-10 h | h-mjeseci | 85-90 |
| Superkondenzatori | 0-300 kW | ms-60 min | s-h | 85-95 |
| Supravodljive magnetne zavojnice | 100 kW-10 MW | ms-8 s | Min-h | 95-98 |

1.2.2. Skladištenje toplinske i rashladne energije

Tehnologije skladištenja toplinske i rashladne energije skladište energiju akumuliranjem toplinske energije u izoliranom mediju njegovim grijanjem ili njegovim hlađenjem odvođenjem topline od izoliranog medija, tako da temperatura korištenog medija u toplinskom spremniku bude viša ili niža u odnosu na okolišnu, ovisno o ulozi sustava. Akumulirana energija može biti kasnije iskorištena za potrebe grijanja ili hlađenja, te za proizvodnju električne energije. Tehnologije omogućuju bolju fleksibilnost sustava opskrbe energijom, povećavaju učinkovitost određenih postrojenja, te smanjuju troškove i emisije ugljičnog dioksida.

Vrste tehnologija za skladištenje toplinske i rashladne energije:

- skladištenje osjetne topline,
- skladištenje latentne topline,
- termokemijsko skladištenje topline,
- sorpcijsko skladištenje topline; [15].

Skladištenje osjetne topline je jedan od najučestalijih načina skladištenja energije. Kod tehnologija skladištenja osjetne topline energija se skladišti promjenom temperature

materijala. Količina skladištene energije ovisi o specifičnom toplinskom kapacitetu materijala u kojem se ona skladišti, te o ostvarenoj razlici temperatura prilikom grijanja ili hlađenja. Dakle da bi sustavi mogli učinkovito skladištiti veće količine energije moraju koristiti materijale koji imaju visok specifični toplinski kapacitet poput vode ili pak moraju biti sposobni ostvariti velike razlike temperatura poput kamena, betona ili keramike. Naravno materijal mora biti adekvatno izoliran, te ne prolazi kroz promjenu agregatnog stanja.

Skladištenjem latentne topline mediju se mijenja agregatno stanje, što znači da će se prilikom skladištenja i pražnjenja sustava toplinskom ili rashladnom energijom održavati približno konstantna temperatura u toplinski izoliranom spremniku. Uglavnom se koriste pretvorbe iz krutog u tekuće ili iz tekućeg u kruto agregatno stanje. Dakle potrebno je koristiti materijale koji imaju visoku specifičnu latentnu toplinu taljenja ili eventualno isparavanja. Dobra strana ovakvog skladištenja u odnosu na skladištenje osjetne topline je potreba za manjim volumenom skladištenja iste količine energije.

Termokemijsko skladištenje topline odvija se korištenjem promjene entalpije sustava reverzibilnim kemijskim reakcijama npr. vezanja vodika u metal-hidridima, prilikom pada tlaka otvaranjem ventila na boci vodik se odvajaju od metala, te se oslobađa toplina; [15].

Tehnologije sorpcijskog skladištenja topline možemo podijeliti na apsorpcijske i adsorpcijske. Apsorpcijske su one koje koriste fenomen apsorpcije plina ili pare od strane druge tvari koja je u tekućem agregatnom stanju (npr. apsorpcija amonijaka od strane vode ili apsorpcija vode od strane litijevog bromida). Adsorpcijske su one tehnologije kod kojih se plin ili para veže za površinu poroznog materijala (npr. vezanje molekula vode za zeolit); [16].

Tehnologije skladištenja toplinske i rashladne energije obuhvaćaju velik broj tehnologija od kojih su u ovom radu opisane one koje su iskoristive u sustavima za centraliziranu opskrbu toplinske i rashladne energije pomoću mreže centraliziranog grijanja i hlađenja.

1.2.2.1. Skladištenja toplinske i rashladne energije u metalnom spremniku s vodom

Medij koji se najčešće koristi za pohranu toplinske i rashladne energije je voda, ta činjenica je uvjetovana pristupačnosti vode kao medija, niskom cijenom i visokim specifičnim toplinskim kapacitetom vode. Osim što se koristi kao medij za skladištenje toplinske i rashladne energije, koristi se kao medij za transport energije kroz mrežu za centralizirano grijanje i hlađenje. Spremnici su obično volumena od više stotina metara kubnih. Temperatura vode u spremniku ovisi o ulozi spremnika, te o režimu polaza centraliziranog grijanja (65 °C

do $>90\text{ }^{\circ}\text{C}$) ili hlađenja. Temperaturna stratifikacija unutar spremnika omogućava oduzimanje vode na različitim temperaturama za razne primjene. Vodu je moguće skladištiti u velikim spremnicima za potrebe centralizirane opskrbe toplinskom i rashladnom energijom, koji mogu biti nad zemljom, te djelomično ili potpuno ukopani u zemlju. Materijali od kojih je napravljen spremnik za skladištenje vode su obično od nehrđajućeg čelika, aluminija, armiranog betona ili od stakloplastike.



Slika 7. Toplinski akumulator TE-TO Zagreb; [17]

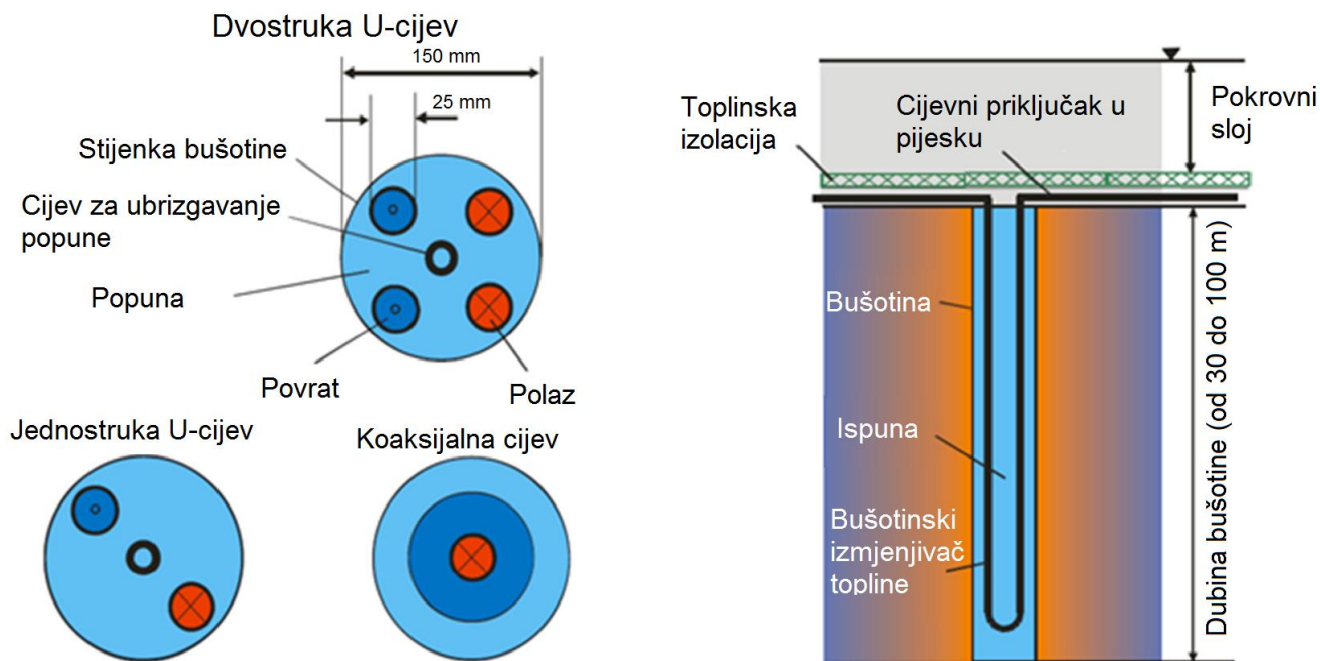
Kako bi se toplinski gubici minimalizirali koristi se izolacija od mineralne vune, staklene vune ili od poliuretanske pjene. Izmjenjivačke površine za grijanje ili za hlađenje vode mogu biti u obliku zavojnice postavljene na dno spremnika, voda može biti grijana ili hlađena izvan samog spremnika u posebnim izmjenjivačima topline. Izmjenjivač topline također može biti izveden tako da se fluid za izmjenu topline nalazi u dvoslojnoj stjenki spremnika. Ovakav izmjenjivač ima veliku izmjenjivačku površinu, te dobru učinkovitost izmjene topline, ali i veću cijenu. Ovakva pohrana energije se najčešće koristi za kratkoročnu dnevnu pohranu koja omogućuje balansiranje proizvodnje od nekoliko sati, pa sve do nekoliko dana; [15], [16].

1.2.2.2. Skladištenje toplinske i rashladne energije u izoliranoj jami s vodom

Radi smanjenja troškova, te za skladištenje energije većih razmjera moguće je koristiti podzemne jame na čiji rub je potrebno postaviti izolaciju, te vodonepropusnu ovojnicu. Kao medij za skladištenje energije moguće je koristiti vodu, šljunak u kombinaciji s vodom ili pijesak u kombinaciji s vodom. Potrebno je na vrh medija postaviti plutajući toplinsko izolirajući poklopac. Moguće je iskoristiti iskopanu zemlju kako bi se izgradila brana oko jame radi povećavanja dubine same jame. Ovakvo skladištenje toplinske i rashladne energije se obično koristi za sezonsko skladištenje energije. Sezonsko skladištenje energije omogućava pohranu toplinske energije tijekom vrućih ljetnih mjeseci, te iskorištavanje te topline tijekom hladnih zimskih mjeseci. Isto tako moguće je sezonski skladištiti rashladnu energiju tijekom zimskih mjeseci za korištenje po ljeti. Osim što se koriste za sezonsko skladištenje energije, rjeđe se koriste i za dnevnu pohranu energije; [15], [16].

1.2.2.3. Geotermalno skladištenja toplinske i rashladne energije

Također je moguće geotermalno skladištenje energije gdje se podzemlje koristi kao medij za skladištenje energije. Ova tehnologija koristi vertikalno postavljene izmjenjivače ukopane u zemlji pomoću kojih se odvija izmjena topline s podzemnim slojevima zemlje. Izmjenjivači su uobičajeno načinjeni od polietilenskih jednostrukih, dvostrukih U-cijevi ili koaksijalnih cijevi umetnutih u bušotinu koja je zatim ispunjena smjesom bentonita i cementa radi dobre toplinske vodljivosti. Ideja je instalirati velik broj centralno povezanih bušotina, kako bi se ostvario dovoljno velik kapacitet za skladištenje energije. Bušotine su udaljene jedna od druge od 2 do 4 metra. Kroz cijevi struji voda pomiješana glikolom kako bi se spriječilo zamrzavanje fluida prilikom temperatura manjih od 0 °C. Tla prikladna za ovakvu pohranu energije su tla s vodom natopljenom zemljom ili kamenita tla. Bušotine su duboke 30 do 100 m. Na površinu zemlje može biti postavljena toplinska izolacija. Ovakvi sustavi su također češće korišteni za sezonsko skladištenje energije; [15], [16].



Slika 8. Bušotinski izmjenjivač topline; [18]

1.2.2.4. Skladištenja toplinske i rashladne energije u vodonosniku

Toplinska i rashladna energija se mogu skladištiti u vodonosniku. Vodonosnik je podzemni široko rasprostranjeni sloj pijeska, šljunka, vapnenca koji je propustljiv i obilat vodom tijekom godine. Potrebno je postojanje vodonepropusnih slojeva zemlje iznad i ispod vodonosnika, te bi podzemna brzina strujanja vode trebala biti što manja ili jednaka nuli kako bi skladištenje toplinske i rashladne energije bilo moguće. Potrebno je iskopati dvije skupine bunara dovoljno međusobno udaljene kako ne bi došlo do miješanja tople i hladne vode. Prilikom punjenja toplinskom energijom hladna podzemna voda se usisava u jednoj skupini bunara, nakon čega se grije i vraća natrag u vodonosnik na drugoj lokaciji. Prilikom korištenja akumulirane toplinske energije topla voda se usisava, hladi u izmjenjivaču za potrebe grijanja, te se vraća na drugoj lokaciji. Za potrebe hlađenja procesi su suprotni. Mana ovakvih sustava je nemogućnost termalne izolacije vodonosnika. Skladištenje energije je u niskotemperaturnom režimu do 20 °C, ali u slučaju većih dubina i povoljnih podzemnih uvjeta temperatura skladištenja može biti i viša. Ova tehnologija se uglavnom koristi za sezonsku pohranu energije. Važno je voditi računa o salinitetu vode, radi sprječavanja korozije; [15], [16].

Sve navedene tehnologije mogu kao izvor topline koristiti toplinu iz solarnih kolektora, otpadnu toplinu te toplinu iz kogeneracijskih postrojenja za grijanje, dok bi za hlađenje bile potrebne apsorpcijske dizalice topline koje koriste toplinu za hlađenje. U slučaju da nema na

raspolaganju toplinske energije moguće je koristiti električnu energiju u kompresijskim dizalicama topline za korištenje topline iz zemlje, podzemnih voda ili čak voda stajačica poput mora i jezera za potrebe grijanja i hlađenja.

2. OPIS METODA I MODELA (METODOLOGIJA)

2.1. Metodologija proračuna specifičnih troškova

U sljedećem dijelu završnog rada prikazan je tijek proračuna specifičnih troškova tehnologija skladištenja energije. Specifični troškovi su izračunati prema sljedećim izrazima:

$$ST_E = \frac{IT + \sum_{n=1}^N (VT + FT) \cdot (1 + i)^{-N}}{n \cdot E_P \cdot X_P \cdot \eta_P}, \quad (1)$$

$$ST_P = \frac{IT + \sum_{n=1}^N (VT + FT) \cdot (1 + i)^{-N}}{P_N \cdot C_P}, \quad (2)$$

Gdje je:

ST_E – specifični trošak sustava po MWh [EUR/MWh],

ST_P – specifični trošak sustava po MW [MEUR/MW],

IT – ukupni investicijski troškovi sustava [EUR],

VT – varijabilni pogonski troškovi i troškovi održavanja sustava [EUR/god.],

FT – fiksni pogonski troškovi i troškovi održavanja sustava [EUR/god.],

N – životni vijek sustava [god.],

i – diskontna stopa,

n – broj ciklusa punjenja i pražnjenja sustava tijekom životnog vijeka,

E_P – kapacitet skladištenja energije sustava [MWh],

X_P – dubina pražnjenja sustava energijom [%],

η_P – učinkovitost skladištenja i pražnjenja sustava energijom [%],

P_N – maksimalna nazivna snaga pražnjenja sustava energijom [MW],

C_P – faktor iskorištenja snage tijekom životnog vijeka sustava [%],

U izrazima (1) i (2) u nazivniku je izostavljena vremenska komponenta diskontiranja kako bi se u analizi dala prednost tehnologijama koje su pogodnije za dugoročno održivi razvoj. Za tehnologije skladištenja električne energije biti će proračunati specifični troškovi prema izrazima (1) i (2), dok će specifični troškovi tehnologija skladištenja toplinske i rashladne energije biti proračunati samo prema izrazu (1).

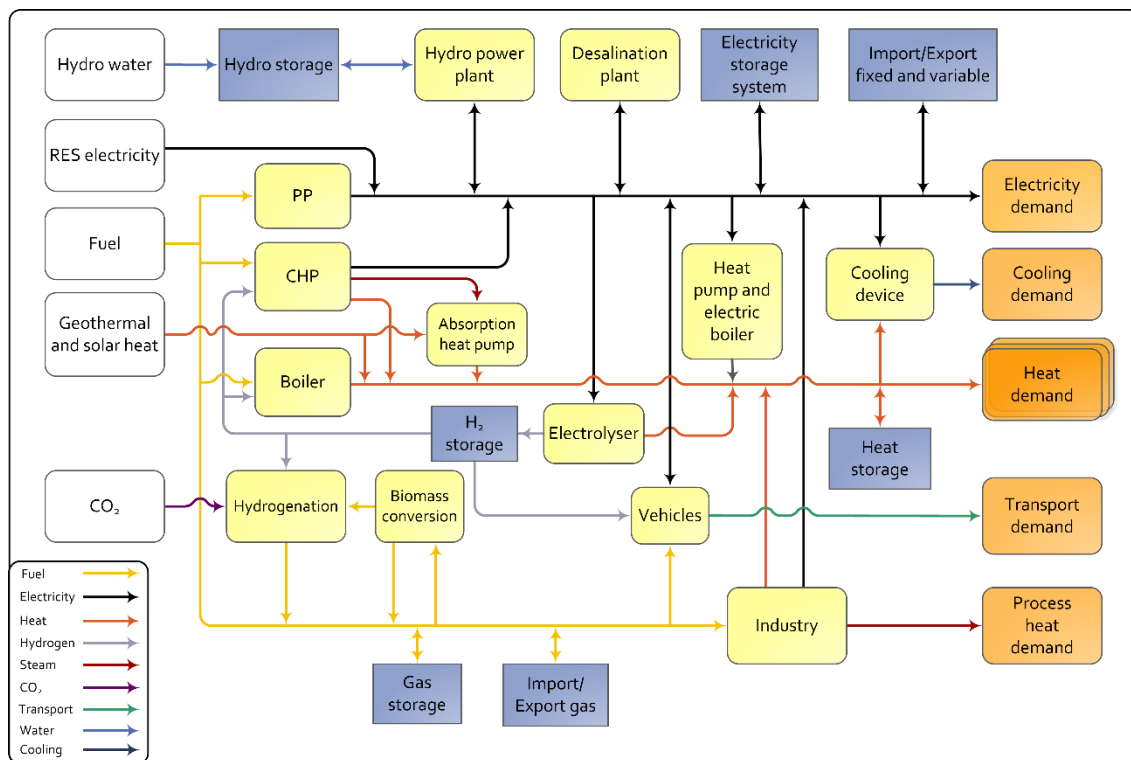
2.2. EnergyPLAN scenariji za Grad Dubrovnik

Dubrovnik je grad smješten na Jadranskom moru, na jugu Hrvatske. Prostire se na 143,35 km², a prema popisu iz 2011. godine Dubrovnik je bio naseljen sa 42 615 stanovnika. Tijekom

povijesti je bio kulturno i znanstveno središte regije iz kojeg potječu mnogi hrvatski velikani. Dubrovnik je danas turističko središte na Jadranu te administrativno središte Dubrovačko-neretvanske županije. Zahvaljujući visokim brojem sunčanih dana u godini (više od 250) ima velik potencijal eksploatacije sunčeve energije. Zahvaljujući vjetrovitosti područja na kojem se nalazi, te prisutnosti mora ima mogućnost eksploatacije energije iz vjetera i topline iz mora. Grad Dubrovnik bi, ukoliko u budućnosti ostvari preduvjete za eksploatacijom energetskih potencijala, mogao postati primjerom napretka i središtem modernih tehnologija; [19].

U ovom radu razrađena su tri scenarija pokrivanja energetskih potreba grada Dubrovnika korištenjem podataka dobivenih izradom referentnog scenarija za 2015. godinu. U scenarijima je predviđeno zadovoljavanje 100 % potreba električne energije Grada Dubrovnika korištenjem solarnih fotonaponskih (PV) elektrana i vjetroelektrana, 50 % potreba za toplinskom i rashladnom energijom korištenjem centraliziranih sustava u Gradu Dubrovniku te zadovoljavanje ostalih 50 % potreba za toplinskom i rashladnom energijom pomoću lokalnih dizalica topline. Pretpostavljeno je da u gradu postoji mreža za centralizirano grijanje i hlađenje za sva naselja. Scenariji su razrađeni korištenjem računalnog programa *EnergyPLAN*.

EnergyPLAN je računalni program koji služi za simuliranje i usporedbu različitih strategija energetskih sustava. Program je idealan za simulaciju energetskih sustava s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije. Program na temelju ulaznih podataka potražnje energije, količina obnovljivih izvora energije, kapaciteta elektrana i toplana te cijena daje rezultate izvoza i uvoza električne energije, proizvedenih viškova električne energije, godišnje količine proizvedene energije, potrošnje goriva te troškove uvezene električne energije i zaradu na izvezenoj električnoj energiji. Računalni program radi proračun za svaki sat tijekom simulirane godine. Dakle proračun se radi za 8784 koraka. Da bi program mogao proračunati rezultate za svaki sat potrebno je u njega unijeti distribucijske krivulje potrošnje električne, toplinske, rashladne energije, te distribucijske krivulje proizvodnje energije iz vjetroelektrana, solarnih fotonaponskih panela, te solarnih kolektora koje sadrže u sebi raspodjelu potrošnje i proizvodnje energije za svaki sat; [20].



Slika 9. *EneryPLAN* model; [19]

Pomoću računalnog programa *EnergyPLAN* dimenzionirani su: vjetroelektrana na Srđu, reverzibilna hidroelektrana, solarni fotonaponski paneli, toplinski solarni kolektori, dizalice topline te toplinski spremnici, za iduća tri scenarija:

- 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz skladištenje energije u reverzibilnoj hidroelektrani,
- 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje solarnih termalnih kolektora te centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava sa spremnicima toplinske energije,
- 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje baterija za skladištenje električne energije.

Scenariji su optimizirani prema minimalnom godišnjem trošku sustava, uključujući i diskontirane investicijske troškove, iteriranjem. Uspoređeni su troškovi referentnog sustava, scenarijskih sustava bez skladištenja energije, sa skladištenjem energije te samodostatni sustav ukoliko je to moguće. U zadatku je u drugom scenariju zadano korištenje spremnika skladištenja rashladne energije, ali EnergyPLAN ne može simulirati takvo skladištenje direktno, pa je odrađena simulacija bez skladištenja rashladne energije.

2.3. Metodologija proračuna prostornih ograničenja

U svrhu simuliranja scenarija korištenjem *EnergyPLAN* računalnog programa u sljedećem djelu su prikazane metode proračuna prostornih ograničenja za vjetroelevtrane, fotonaponske module i solarne kolektore.

2.3.1. Metodologija proračuna prostornih ograničenja za vjetroelevtrane

Za potrebe simulacija predviđeno je korištenje instaliranih kapaciteta vjetroatregata koji bi stali na brdo Srđ iznad Grada Dubrovnika tako da nisu vidljivi iz Starog Grada. Neće biti uzeta u obzir ograničenja vezana za udaljenost vjetroatregata od naselja, pošto je područje gusto naseljeno i ni jedan vjetroatregat ne bi mogao biti instaliran na brdo Srđ. Dakle potrebno je da promatrač koji je na najvišoj i najudaljenijoj točki od brda Srđ nije u mogućnosti vidjeti vrh lopatica radnog kola vjetroatregata, koje zaklanja vrh brda. Promatrač neće vidjeti vrh lopatica radnog kola vjetroatregata ukoliko je kut β između pravca, koji prolazi kroz oči promatrača i vrha lopatica, i pravca horizontale jednak ili manji od kuta α između pravca, koji prolazi kroz oči promatrača i najviše točke brda između promatrača i vjetroatregata, i pravca horizontale. Kutove je moguće dobiti prema sljedećim izrazima:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Z_B - Z_G}{L_B}\right), \quad (3)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{Z_v - Z_G}{L_v}\right), \quad (4)$$

gdje je:

Z_B – nadmorska visina najviše točke brda koja je između mjesta instaliranog vjetroatregata i promatrača [m],

Z_G – nadmorska visina promatrača [m],

L_B – zračna udaljenost između promatrača i najviše točke brda koja je između instaliranog vjetroatregata i promatrača [m],

Z_v – nadmorska visina vrha lopatice radnog kola vjetroatregata [m],

L_v – zračna udaljenost između promatrača i instaliranog vjetroatregata [m],

Proračun je rađen tako da je izračunat prvo kut α korištenjem [21] za visine izohipsa i [22] za određivanje zračnih udaljenosti. Nakon što je dobiven kut α , za kut β jednak kutu α izračunate su potrebne udaljenosti od promatrača do vjetroatregata kako vrhovi lopatica radnih kola ne bi

bili vidljivi iz Starog Grada. Dobivena je površina na koju je moguće izgraditi vjetroeletreane prema [23], na kojoj su raspoređeni vjetroatregati međusobne udaljenosti 3 promjera lopatica radnog kola korištenog vjetroatregata, čime je dobivena maksimalno moguće instalirana nazivna snaga vjetroeletreane. Lokacije promatrača su odabrane, tako da su na najudaljenijim i najvišim mjestima u odnosu na vjetroatregate.

2.3.2. Metodologija izračuna prostornih ograničenja za fotonaponske module

Za fotonaponske module prostorna ograničenja su ekvivalentna površini krovova u Gradu Dubrovniku. Tako da je maksimalno moguća instalirana snaga fotonaponskih modula izračunata prema izrazu (5):

$$P_{UPV} = A_{KR} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot p_{PV}, \quad (5)$$

gdje je:

P_{UPV} – maksimalna nazivna snaga svih instaliranih fotonaponskih modula [MW],

A_{TD} – ukupna tlocrtna površina prizemlja svih kuća i zgrada u Gradu Dubrovniku [m²],

K_1 – koeficijent korekcije površine krovova prema udjelu krovova okrenutih prema južnoj strani,

K_2 – koeficijent korekcije površine krovova prema iskoristivosti površine krovova za instalaciju fotonaponskih panela,

p_{PV} – specifična nazivna snaga fotonaponskih modula [MW/m²].

Pretpostavljeno je da je moguće fotonaponske panele postaviti na sve krovove zgrada i kuća u Gradu Dubrovniku, ali samo na onaj dio površina krovova koji je okrenut na južnu stranu. Korištena je tlocrtna površina prizemlja svih zgrada i kuća pomoću koje je pretpostavljena površina krovova u Gradu Dubrovniku. Također je ranije spomenuta površina korigirana s koeficijentima K_1 i K_2 pomoću kojih je dobivena površina krovova na koju je moguće instalirati solarne fotonaponske panele.

2.3.3. Metodologija izračuna prostornih ograničenja za solarne kolektore

Maksimalno moguća toplinska energija koju je moguće dubiti u jednoj godini izgradnjom toplinskih solarnih kolektora za centralno grijanje izračunata je prema izrazu (6):

$$E_{UK} = A_k \cdot K_3 \cdot \eta_K \cdot \sum_{n=1}^{8784} G_i, \quad (6)$$

gdje je:

- E_{UK} – maksimalno moguća toplinska energija koju je moguće dubiti u jednoj godini [MWh],
- A_k – površina na koju je moguće instalirati toplinske solarne kolektore [m^2],
- K_3 – koeficijent korekcije površine na koju je moguće instalirati toplinske solarne kolektore zbog postojanja infrastrukture i strmih kosina na predviđenoj površini,
- η_K – prosječna godišnja učinkovitost solarnih kolektora [%],
- G_i – globalno zračenje u određenom satu [MW/m^2].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Rezultati proračuna specifičnih troškova tehnologija skladištenja energije

U sljedećem poglavlju prikazani su korišteni podaci i rezultati proračuna specifičnih troškova tehnologija skladištenja energije. Proračunate su one tehnologije za koje su pronađeni podaci te one tehnologije koje bi se mogle koristiti za skladištenje energije velikih razmjera radi ostvarivanja visokih postotaka udjela obnovljivih izvora energije u sustavima opskrbe električnom, toplinskom i rashladnom energijom. Za proračun korištene su formule (1), (2) uz diskontnu stopu od 5 %.

3.1.1. Proračun specifičnih troškova reverzibilne hidroelektrane

Za potrebe proračuna preuzete su vrijednosti investicijskih troškova, varijabilnih i fiksnih operativnih troškova i troškova održavanja, te podaci za životni vijek postrojenja sa stranica *Energyplan* programa [20] za 2020. godinu. Investicijski troškovi su podijeljeni na investicijski trošak pumpe koji je 0,6 MEUR/MW električne snage pumpe, investicijski trošak turbine koji je također 0,6 MEUR/MW električne snage turbine te na investicijski trošak spremnika energije koji obuhvaća sve troškove izgradnje akumulacije, a koji je 7,5 MEUR/GWh. Fiksni operativni troškovi i troškovi održavanja su procijenjeni na 1,5 % vrijednosti investicijskog troška godišnje. Varijabilni operativni troškovi i troškovi održavanja su 1,19 EUR/MWh potrošene energije za rad pumpe, te 1,19 EUR/MWh predane električne energije mreži za rad turbine. Ukupna učinkovitost sustava skladištenja električne energije je izabrana prema podacima iz prvog dijela završnog rada [Tablica 1.] i iznosi 81 %, tako da možemo pretpostaviti učinkovitost punjenja sustava energijom 90 % (punjenje akumulacije pumpanjem) u odnosu na potrošnju električne energije te učinkovitost pražnjenja sustava energijom 90 % (pražnjenje akumulacije te ostvarivanje rada na turbini), u odnosu na predanu energiju električnoj mreži. Životni vijek postrojenja prema [20] je 50 godina. Proračun je proveden za različite električne snage pumpe i turbine, te za različite kapacitete skladištenja energije kako bi se mogli usporediti rezultati u odnosu na kapacitete. Proračun za električne snage pumpa i turbina su odrađene redom za snage 50 MW, 90 MW, 130 MW, 170 MW i 200 MW. Kapaciteti skladištenja energije su procijenjeni tako da je moguće opskrbiti električnu mrežu na koju je sustav spojen maksimalnom električnom snagom 10 sati jednom dnevno, 3 dana jednom tjedno te 13 dana jednom mjesečno. Ukupna električna energija predana električnoj mreži je izračunata prema prethodno objašnjenim režimima rada. U tablicama [Tablica 2.], [Tablica 3.] i [Tablica 4.]

prikazane su vrijednosti specifičnih troškova, sadašnje vrijednosti troškova, te količina plasirane električne energije u električnu mrežu tokom životnog vijeka sustava (50 godina) u ovisnosti o električnim snagama pupe, turbine, kapacitetu skladištenja energije te o broju ciklusa punjenja i pražnjenja sustava tijekom životnog vijeka sustava.

Tablica 2. Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 10 sati rada pri maksimalnom el. snagom turbine

| El. snaga pumpe i turbine (MW) | Broj ciklusa | Kapacitet (GWh) | Plasirana el. energija (TWh) | Sadašnja vrijednost troškova (MEUR) | Specifični trošak (EUR/MWh) | Specifični trošak (MEUR/MW) |
|--------------------------------|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 18250 | 0,56 | 9,125 | 90,60 | 9,93 | 4,35 |
| 90 | 18250 | 1 | 16,425 | 163,08 | 9,93 | 4,35 |
| 130 | 18250 | 1,44 | 23,725 | 235,55 | 9,93 | 4,35 |
| 170 | 18250 | 1,89 | 31,025 | 308,03 | 9,93 | 4,35 |
| 200 | 18250 | 2,22 | 36,500 | 362,39 | 9,93 | 4,35 |

Već na prvi pogled rezultata iz [Tablica 2.] je vidljivo kako su specifični troškovi za različite snage jednaki, to je uvjetovano time što se sadašnja vrijednost troškova povećanjem snage povećava s istim koeficijentom kao i ukupna plasirana energija u električnu mrežu. Još jedan razlog je taj što je uz povećavanje snage u proračunu povećana i količina električne energije predane električnoj mreži, tako da su ostvarivi predviđeni režimi pražnjenja električnom energijom.

Tablica 3. Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 3 dana rada pri maksimalnom el. snagom turbine

| El. snaga pumpe i turbine (MW) | Broj ciklusa | Kapacitet (GWh) | Plasirana el. energija (TWh) | Sadašnja vrijednost troškova (MEUR) | Specifični trošak (EUR/MWh) | Specifični trošak (MEUR/MW) |
|--------------------------------|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 2607 | 4,00 | 9,386 | 123,76 | 13,19 | 5,78 |
| 90 | 2607 | 7,2 | 16,894 | 163,08 | 13,19 | 5,78 |
| 130 | 2607 | 10,40 | 24,403 | 235,55 | 13,19 | 5,78 |

| | | | | | | |
|-----|------|-------|--------|--------|-------|------|
| 170 | 2607 | 13,60 | 31,911 | 420,78 | 13,19 | 5,78 |
| 200 | 2607 | 16,00 | 37,543 | 495,03 | 13,19 | 5,78 |

Tablica 4. Rezultati proračuna specifičnih troškova s kapacitetom skladištenja energije za 13 dana rada pri maksimalnom el. snagom turbine

| El. snaga pumpe i turbine (MW) | Broj ciklusa | Kapacitet (GWh) | Plasirana el. energija (TWh) | Sadašnja vrijednost troškova (MEUR) | Specifični trošak (EUR/MWh) | Specifični trošak (MEUR/MW) |
|--------------------------------|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 589 | 17,33 | 9,125 | 250,95 | 27,32 | 11,97 |
| 90 | 589 | 31,2 | 16,425 | 451,70 | 27,32 | 11,97 |
| 130 | 589 | 45,07 | 23,725 | 652,46 | 27,32 | 11,97 |
| 170 | 589 | 58,93 | 31,025 | 853,22 | 27,32 | 11,97 |
| 200 | 589 | 69,33 | 36,500 | 1.003,78 | 27,32 | 11,97 |

Iz rezultata u [Tablica 2.], [Tablica 3.], [Tablica 4.] je vidljivo kako povećavanje kapaciteta skladištenja energije u vidu povećanja sigurnosti opskrbe energijom uzrokuje neminovno povećavanje specifičnih troškova sustava. Također je vidljivo iz rezultata kako je plasirana snaga za različite režime rada pri jednakim instaliranim električnim snagama pumpe i turbine približno jednaka, to je zato jer je prosječna električna godišnja snaga turbine za različite režime rada približno jednaka.

3.1.2. Proračun specifičnih troškova natrij-sumpornih baterija

Podaci investicijskih troškova, operativnih troškova, troškova održavanja su preuzeti s [24]. Korištena je srednja vrijednost investicijskih troškova koja iznosi 451,7 kEUR/MWh banke baterija, te srednja vrijednost operativnih troškova i troškova održavanja koja iznosi 9318 EUR/MWh banke baterija godišnje. Životni vijek je prema [24] između 15 i 20 godina, proračun je rađen sa životnim vijekom od 17 godina. Iskoristivi kapacitet baterije je 80 %, učinkovitost sustava je također 80 %, pa ćemo pretpostaviti učinkovitost pražnjenja energijom od 89,44%; [24]. Fiksni troškovi održavanja uzimaju u obzir sve troškove potrebne za održavanje baterije u radnom stanju tako da je moguće koristiti nazivni iskoristivi kapacitet baterije tijekom životnog vijeka. Proračun je rađen za sustave maksimalne izlazne električne snage 50 MW i kapaciteta 300 MWh, 90 MW i kapaciteta 540 MWh, snage 130 MW i 780

MWh, 170 MW i 1020 MWh te 200 MW i 1200 MWh. Pretpostavljeno je punjenje i pražnjenje sustava jednom dnevno. Rezultati su prikazani u tablici [Tablica 5.]

Tablica 5. Rezultati proračuna specifičnih troškova natrij-sumpornih baterija

| Vršna el. snaga (MW) | Broj ciklusa | Kapacitet (MWh) | Plasirana el. energija (GWh) | Sadašnja vrijednost troškova (MEUR) | Specifični trošak (EUR/MWh) | Specifični trošak (MEUR/MW) |
|----------------------|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 6205 | 300 | 1332 | 167,03 | 125,4 | 8,02 |
| 90 | 6205 | 540 | 2398 | 300,65 | 125,4 | 8,02 |
| 130 | 6205 | 780 | 3463 | 434,27 | 125,4 | 8,02 |
| 170 | 6205 | 1020 | 4529 | 567,89 | 125,4 | 8,02 |
| 200 | 6205 | 1200 | 5328 | 668,10 | 125,4 | 8,02 |

3.1.3. Proračun specifičnih troškova litij-ionskih baterija

Podaci investicijskih troškova, operativnih troškova, troškova održavanja su preuzeti s [24]. Korištena je srednja vrijednost investicijskih troškova koja iznosi 842,5 kEUR/MWh banke baterija te srednja vrijednost operativnih troškova i troškova održavanja koja iznosi 8363 EUR/MWh banke baterija baterije godišnje. Životni vijek je prema [24] između 15 i 20 godina, proračun je rađen sa životnim vijekom od 17 godina. Iskoristivi kapacitet baterije je 80 %, učinkovitost sustava je 90 %, pa ćemo pretpostaviti učinkovitost pražnjenja energijom od 94,87 %; [24]. Proračun je rađen samo za vršnu električnu snagu banke baterija od 130 MW i 520 MWh zbog korištenja metodologije koja daje jednake specifične troškove. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 487,13 milijuna eura. Količina energije predane električnoj mreži tijekom životnog vijeka sustava je 2449 GWh uz 6205 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom. Specifični trošak litij-ionske baterije po MWh predane energije električnoj mreži je 198,92 EUR/MWh. Specifični trošak litij-ionske baterije po MW prosječne električne snage koju sustav daje tijekom životnog vijeka je 8,99 MEUR/MW.

3.1.4. Proračun specifičnih troškova olovnih baterija

Podaci investicijskih troškova, operativnih troškova, troškova održavanja su preuzeti s [24]. Korištena je srednja vrijednost investicijskih troškova koja iznosi 462,5 kEUR/MWh banke

baterija te srednja vrijednost operativnih troškova i troškova održavanja koja iznosi 6315 EUR/MWh banke baterija baterije godišnje. Životni vijek je prema [24] između 15 i 20 godina, proračun je rađen sa životnim vijekom od 17 godina. Iskoristivi kapacitet baterije je 33 %, učinkovitost sustava je 88 %, pa ćemo pretpostaviti učinkovitost pražnjenja energijom od 93,8 %; [24]. Punjenje i pražnjenje sustava je jednom dnevno. Proračun je rađen samo za vršnu električnu snagu banke baterija od 130 MW i 520 MWh zbog korištenja metodologije koja daje jednake specifične troškove. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 277,52 milijuna eura. Količina energije predane električnoj mreži tijekom životnog vijeka sustava je 998,8 GWh uz 6205 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom. Specifični trošak olovne baterije po MWh predane energije električnoj mreži je 277,87 EUR/MWh. Specifični trošak olovne baterije po MW prosječne električne snage koju sustav daje tijekom životnog vijeka je 5,12 MEUR/MW.

3.1.5. Proračun specifičnih troškova vanadij-redoks baterija

Podaci investicijskih troškova, operativnih troškova, troškova održavanja su preuzeti s [24]. Korištena je srednja vrijednost investicijskih troškova koja iznosi 542 kEUR/MWh baterije te srednja vrijednost operativnih troškova i troškova održavanja koja iznosi 11182 EUR/MWh baterija godišnje. Životni vijek je prema [24] između 15 i 20 godina, proračun je rađen sa životnim vijekom od 17 godina. Iskoristivi kapacitet baterije je 80 %, učinkovitost sustava je 85 %, pa ćemo pretpostaviti učinkovitost pražnjenja energijom od 92,12 %; [24]. Punjenje i pražnjenje sustava je jednom dnevno. Proračun je rađen samo za vršnu električnu snagu banke baterija od 130 MW i 650 MWh zbog korištenja metodologije koja daje jednake specifične troškove. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 434,24 milijuna eura. Količina energije predane električnoj mreži tijekom životnog vijeka sustava je 2743 GWh uz 6205 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom. Specifični trošak vanadij-redoks baterije po MWh predane energije električnoj mreži iznosi 158,33 EUR/MWh. Specifični trošak vanadij-redoks baterije po MW prosječne električne snage koju sustav daje tijekom životnog vijeka je 8,02 MEUR/MW.

3.1.6. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja energije s vodikom

Za proračun specifičnih troškova sustava koji koristi vodik kao medij skladištenja energije podaci investicijskih troškova, operativnih troškova, troškova održavanja su preuzeti s [25]. Korištena je vrijednost investicijskih troškova koja iznosi 6,8 kEUR/MWh za skladištenje

vodika, 1,615 milijuna eura po MW maksimalne izlazne snage gorivnih članaka te vrijednost operativnih troškova i troškova održavanja koja iznosi 1,5 % ukupnih investicijskih troškova godišnje. Životni vijek je prema [25] je 5 godina. Iskoristivi spremnika za vodik je 100 %, učinkovitost sustava je 29 %, učinkovitost gorivnih članaka je 43 %; [25]. Punjenje i pražnjenje sustava je jednom dnevno. Proračun je rađen samo za maksimalne izlazne snage gorivnih članaka od 130 MW i 520 MWh. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 227,35 milijuna eura. Količina energije predane električnoj mreži tijekom životnog vijeka sustava je 408,07 GWh uz 6205 ciklusa punjenja i pražnjenja energijom. Specifični trošak po MWh predane energije električnoj mreži iznosi 557,14 EUR/MWh. Specifični trošak po MW prosječne električne snage koju sustav daje tijekom životnog vijeka je 4,02 MEUR/MW.

3.1.7. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u metalnom spremniku s vodom

Za potrebe proračuna podaci su preuzeti s [26]. Investicijski troškovi iznose 210 eura po metru kubnom vode koja se koristi kao medij skladištenja topline. Operativni troškovi i troškovi održavanja su procijenjeni kao u [20] na 0,7 % investicijskih troškova i iznose 1,47 EUR/m³ vode godišnje. Učinkovitost sustava je 95 % prema [26] ukoliko se punjenje i pražnjenje odvija jednom tjedno tijekom sezone grijanja u režimima rada spremnika od 50 do 90 °C s prosječnom vanjskom temperaturom od 5 °C. Kapacitet toplinskog spremnika je 70 kWh po metru kubnom vode. Životni vijek sustava je 20 godina. Sezona grijanja traje 25 tjedana. Volumen vode u spremniku je 10 000 metara kubnih. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 2,283 milijuna eura. Količina toplinske energije predane sustavu centraliziranog grijanja tijekom životnog vijeka sustava je 332,5 GWh uz 500 ciklusa punjenja i pražnjenja toplinskom energijom. Specifični trošak po MWh predane toplinske energije iznosi 6,87 EUR/MWh.

3.1.8. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u izoliranoj jami s vodom

Za potrebe proračuna podaci su preuzeti s [26]. Investicijski troškovi iznose 35 EUR/m³ vode koja se koristi kao medij skladištenja topline. Operativni troškovi i troškovi održavanja su procijenjeni kao u [26] na 0,7 % investicijskih troškova i iznose 0,245 eura po metru kubnom vode godišnje. Varijabilni operativni troškovi i troškovi održavanja iznose 2,27 EUR/MWh predane toplinske energije mreži centraliziranog grijanja. Učinkovitost sustava je 80 % prema [26] ukoliko se punjenje i pražnjenje odvija jednom godišnje. Kapacitet toplinskog spremnika je 70 kWh po metru kubnom vode. Životni vijek sustava je 20 godina. Volumen vode u

spremniku je 60 000 metara kubnih. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 2,302 milijuna eura. Količina toplinske energije predane sustavu centraliziranog grijanja tijekom životnog vijeka sustava je 678,2 GWh uz 20 ciklusa punjenja i pražnjenja toplinskom energijom. Specifični trošak po MWh predane toplinske energije iznosi 34,25 EUR/MWh.

3.1.9. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja toplinske energije u vodonosniku

Za potrebe proračuna dio podataka je preuzet s [26], a drugi dio s [27]. Investicijski troškovi iznose 35 eura po metru kubnom ekvivalenta vode koja se koristi kao medij skladištenja topline. Operativni troškovi i troškovi održavanja su procijenjeni kao u [26] na 1 % investicijskih troškova i iznose 0,35 eura po metru kubnom vode godišnje. Učinkovitost sustava je 75 % prema [27] ukoliko se punjenje i pražnjenje odvija jednom godišnje. Kapacitet toplinskog spremnika je 70 kWh po metru kubnom ekvivalenta vode. Životni vijek sustava je 20 godina. Volumen ekvivalenta vode u spremniku je 5 000 metara kubnih. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 281,155 kEUR. Količina toplinske energije predane sustavu centraliziranog grijanja tijekom životnog vijeka sustava je 5,28 GWh uz 20 ciklusa punjenja i pražnjenja toplinskom energijom. Specifični trošak po MWh predane toplinske energije iznosi 53,55 EUR/MWh.

3.1.10. Proračun specifičnih troškova sustava geotermalnog skladištenja toplinske energije

Podaci su preuzeti iz [28] za potrebe proračuna. Investicijski troškovi su 106,25 eura po metru bušotine. Dubina bušotina je 30 metara, a broj bušotina je 120, tako da ukupni investicijski troškovi iznose 382,5 kEUR. Operativni troškovi i troškovi održavanja su 1,5 % investicijskih troškova godišnje i iznose 5,738 tisuće eura godišnje. Životni vijek sustava je 25 godina. Učinkovitost sustava je 32%. Godišnje predana toplina mreži centraliziranog grijanja je 127,78 MWh godišnje. Volumen zemlje koji služi kao toplinski spremnik velik je 19500 metara kubnih. Punjenje i pražnjenje sustava je jednom godišnje. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 463,36 tisuće eura. Količina toplinske energije predane sustavu centraliziranog grijanja tijekom životnog vijeka sustava je 3,194 GWh uz 25 ciklusa punjenja i pražnjenja toplinskom energijom. Specifični trošak po MWh predane toplinske energije iznosi 143,35 EUR/MWh.

3.1.11. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u metalnom spremniku s vodom

Za proračun troškova su korišteni podaci i dio proračuna iz poglavlja 3.1.7., dok su za proračun rashladnog kapaciteta spremnika energije korišteni podaci iz [29]. Dakle sustav je jednak sustavu opisanom u poglavlju 3.1.7. uz razliku da su temperature skladištenja na drugačijim temperaturnim režimima. Sustav se puni i prazni energijom jednom tjedno kroz 20 tjedana. Rashladni kapacitet je prema [29] 20 kilovatsata po metru kubnom vode. Učinkovitost sustava je prema [29] 97 %. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 2,283 MEUR. Količina rashladnog kapaciteta predanog sustavu centraliziranog hlađenja tijekom životnog vijeka sustava je 77,6 GWh uz 400 ciklusa punjenja i pražnjenja sustava rashladnim kapacitetom. Specifični trošak po MWh rashladnog kapaciteta energije iznosi 29,42 EUR/MWh.

3.1.12. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u izoliranoj jami s vodom

Za proračun troškova su korišteni podaci i dio proračuna iz poglavlja 3.1.8., dok su za proračun rashladnog kapaciteta spremnika energije korišteni podaci iz [29]. Dakle sustav je jednak sustavu opisanom u poglavlju 3.1.8. uz razliku da su temperature skladištenja na drugačijim temperaturnim režimima. Sustav se puni i prazni energijom jednom godišnje. Rashladni kapacitet je prema [29] 20 kilovatsata po metru kubnom vode. Učinkovitost sustava je prema [29] 85 %. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 2,302 miliona eura. Količina rashladnog kapaciteta predanog sustavu centraliziranog hlađenja tijekom životnog vijeka sustava je 20,4 GWh uz 20 ciklusa punjenja i pražnjenja sustava rashladnim kapacitetom. Specifični trošak po MWh rashladnog kapaciteta energije iznosi 112,83 EUR/MWh.

3.1.13. Proračun specifičnih troškova sustava skladištenja rashladne energije u vodonosniku

Za proračun troškova su korišteni podaci i dio proračuna iz poglavlja 3.1.9., dok su za proračun rashladnog kapaciteta spremnika energije korišteni podaci iz [29]. Dakle sustav je jednak sustavu opisanom u poglavlju 3.1.9. uz razliku da su temperature skladištenja na drugačijim temperaturnim režimima. Sustav se puni i prazni energijom jednom godišnje. Rashladni kapacitet je prema [29] 20 kWh/m³e vode. Učinkovitost sustava je prema [29] 75 %. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 281,16 tisuća eura. Količina rashladnog kapaciteta predanog sustavu centraliziranog hlađenja tijekom životnog vijeka sustava je 2 GWh uz 20

ciklusa punjenja i pražnjenja sustava rashladnim kapacitetom. Specifični trošak po MWh rashladnog kapaciteta energije iznosi 140,58 EUR/MWh.

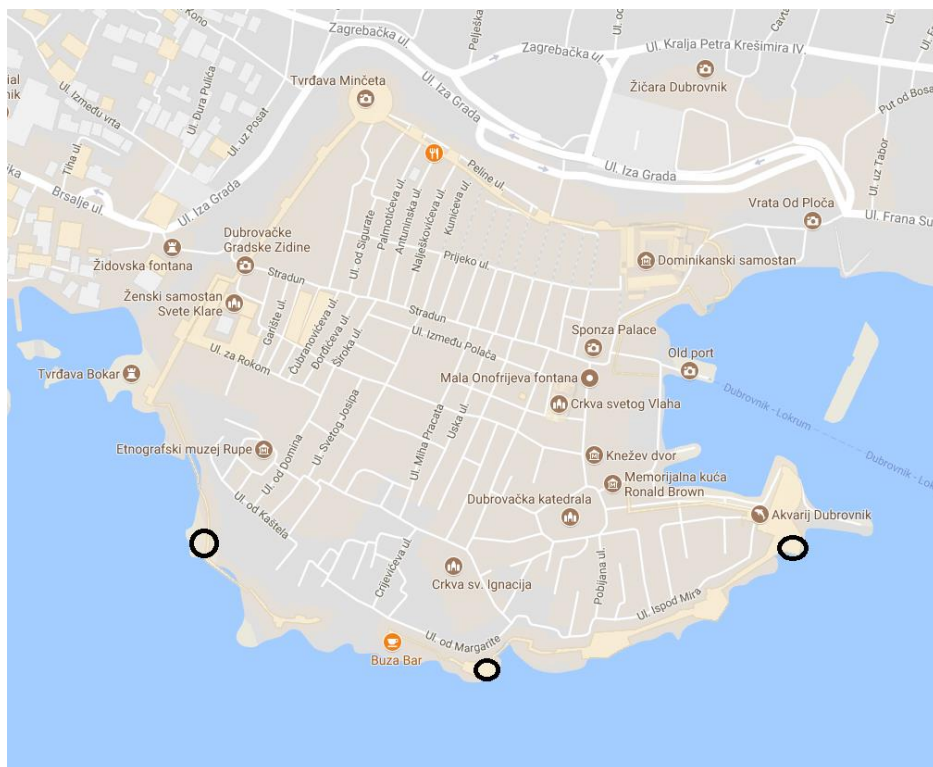
3.1.14. Proračun specifičnih troškova sustava geotermalnog skladištenja rashladne energije

Za proračun troškova su korišteni podaci i dio proračuna iz poglavlja 3.1.10., dok su za proračun rashladnog kapaciteta spremnika energije korišteni podaci iz [29]. Dakle sustav je jednak sustavu opisanom u poglavlju 3.1.10. uz razliku da su temperature skladištenja na drugačijim temperaturnim režimima. Sustav se puni i prazni energijom jednom godišnje. Rashladni kapacitet koji je moguće predati sustavu centraliziranog hlađenja tijekom jedne godine je za sezonsku temperaturnu razliku od 7 °C izračunat uz prosječni toplinski kapacitet zemlje od 2145 KJ/m³°C [28] i uz učinkovitost skladištenja od 40 % i iznosi 32,53 kWh godišnje rashladnog kapaciteta. Ukupna sadašnja vrijednost izračunatih troškova je 457,91 kEUR. Količina rashladnog kapaciteta predanog sustavu centraliziranog hlađenja tijekom životnog vijeka sustava je 813,31 MWh uz 25 ciklusa punjenja i pražnjenja sustava rashladnim kapacitetom. Specifični trošak po MWh rashladnog kapaciteta energije iznosi 563,02 EUR/MWh.

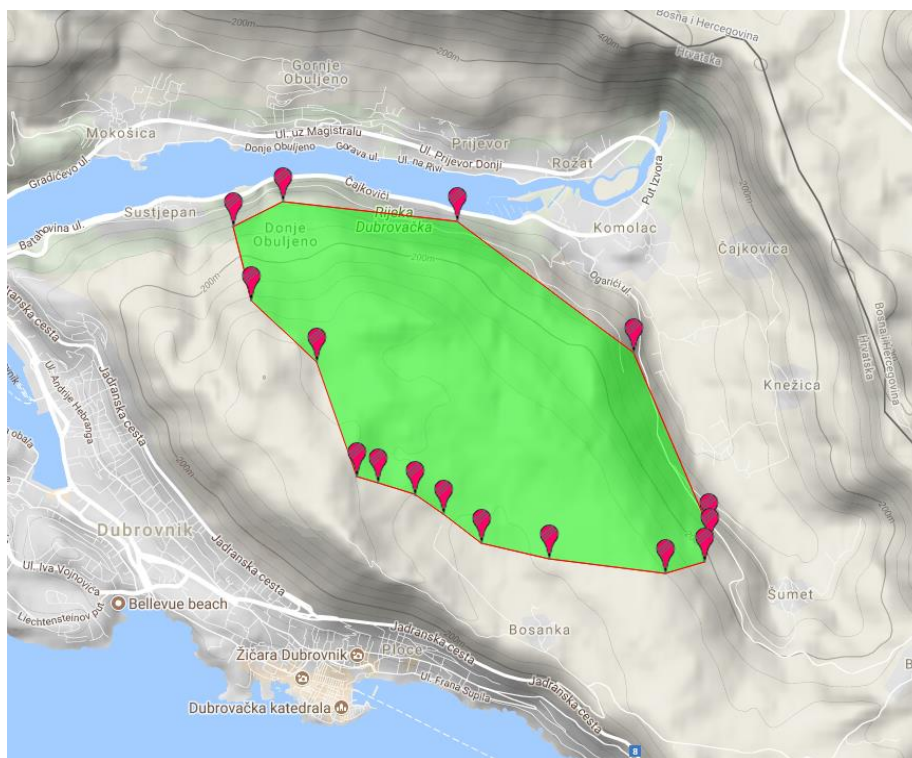
3.2. Rezultati proračuna prostornih ograničenja

3.2.1. Prostorna ograničenja za vjetroelektranu

Nadmorska visina promatrača je 45 m (najviša visina Dubrovačkih zidina je 25 m, na najvišoj nadmorskoj visini od 18 m uz visinu promatrača od 2 m), a korištene lokacije za mjesta promatrača su prikazane na slici [Slika 10.]. Proračun je rađen za vjetroagregat Re Power snage 5 MW koji prema [30] ima visinu tornja 100 m i promjer radnog kola 126 m, tako da je vrh lopatica u odnosu na tlo visok 163 m.

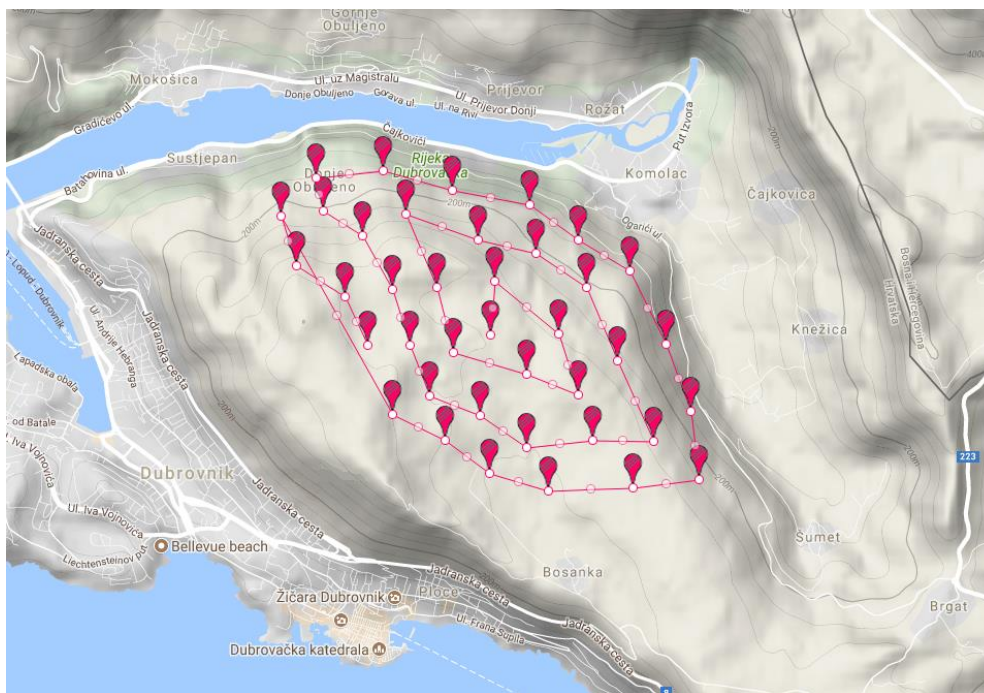


Slika 10. Mjesta u Starom Gradu koja su korištena kao lokacije promatrača; [27]



Slika 11. Površina na kojoj je moguće izgraditi vjetroelektranu; [28]

Korištenjem metodologije opisane u poglavlju 2.3.1. dobivena je površina na kojoj je moguće izgraditi vjetroelektrane kao na slici [Slika 11.] površine 4,58 kilometara kvadratnih prema [31]. Vjetroagregati su raspoređeni tako da je međusobna udaljenost 3 dimenzije promjera radnog kola, odnosno 378 m. Na slici [Slika 12.] je prikazan moguć raspored vjetroagregata pojedinačne nazivne snage 5 MW. Ukupan mogući broj instaliranih vjetroagregata je 40 ukupne snage 200 MW.



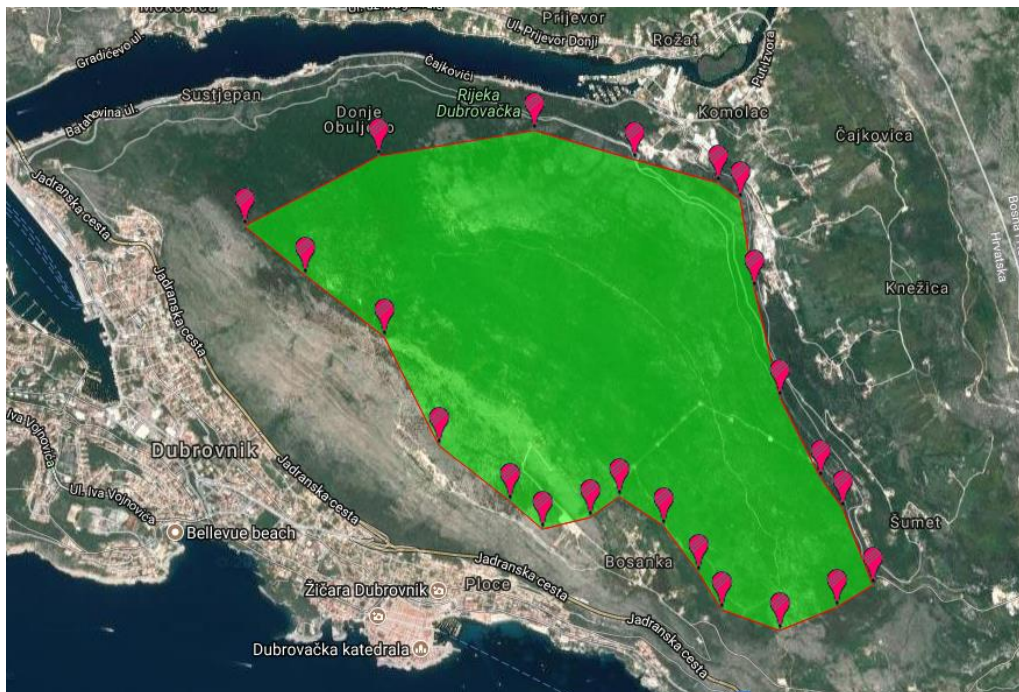
Slika 12. Mogući raspored vjetroagregata; [28]

3.2.2. Prostorna ograničenja za fotonaponske module

Za fotonaponske module prostorna ograničenja su kao što je i ranije rečeno ekvivalentna površini krovova u Gradu Dubrovniku. Prostorna ograničenja su računata prema poglavlju 2.3.2. Ukupna tlocrtna površina zgrada u Gradu Dubrovniku određena je u prijašnjim studijama korištenjem QGIS računalnog programa [31] i iznosi 0,64 kilometara kvadratnih. Pretpostavljeno je da je pola površine krovova okrenuto na odgovarajućoj južnoj strani tako da je K_1 0,5. Također je pretpostavljeno da je na 90 % površine krovova moguće postaviti fotonaponske module, pa je K_2 0,9. Dobivena je maksimalna iskoristiva površina koja iznosi 0,289 km². Za dimenzioniranje su korišteni fotonaponski polikristalni moduli s [32] dužine 1650 cm i širine 992 cm, te nazivne snage 158,85 W/m². Dobivena maksimalno instalirana nazivna snaga fotonaponskih modula je 45,88 MW.

3.2.3. Prostorna ograničenja za solarne kolektore

Prostorna ograničenja za toplinske solarne kolektore nisu definirana u zadatku, pa će se koristiti površina prikazana na slici [Slika 13.] površina je dobivena na stranici [23] i iznosi 5,83 km².



Slika 13. Površina na kojoj je moguća izgradnja toplinskih solarnih kolektora; [28]

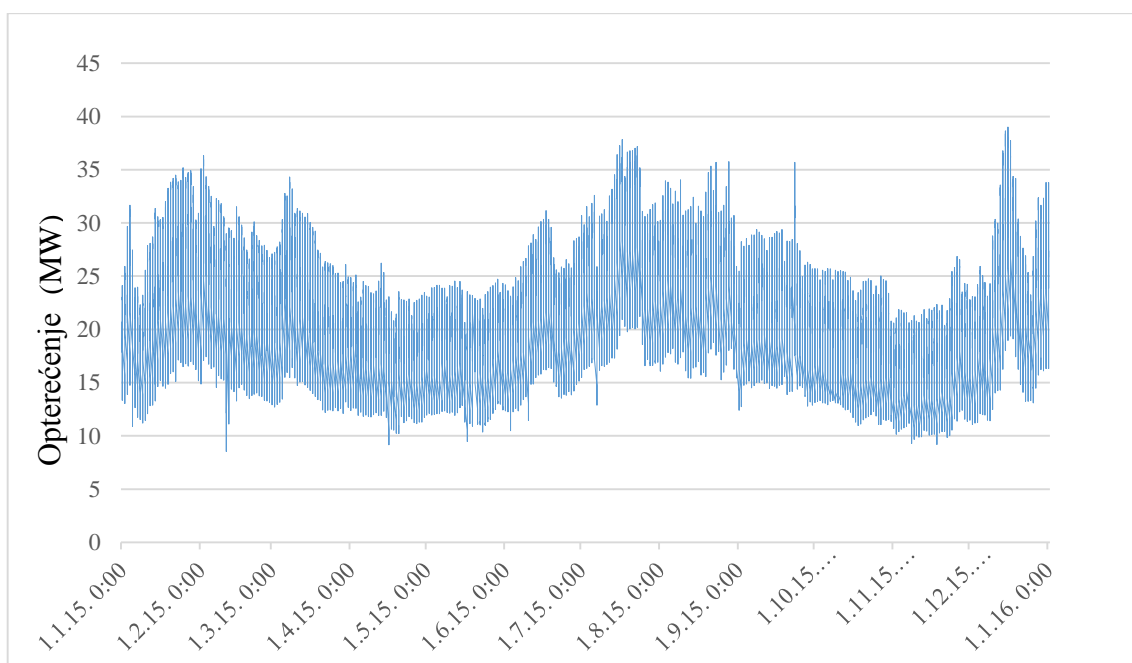
Prostorna ograničenja su računata prema poglavlju 2.3.3. Pošto na određenoj površini postoje ceste i ostala infrastruktura te je planirano postavljanje vjetroagregata na dijelu površine tako da je dobivena površina pomnožena s koeficijentom K_3 , koji iznosi 0,5 kako bi dobili iskoristivu površinu za toplinske solarne kolektore. Konačna maksimalna površina solarnih kolektora iznosi 2,92 km². Prosječna godišnja temperatura za Grad Dubrovnik prema Državnom hidrometeorološkom zavodu [33] iznosi 16 °C. Za prosječnu temperaturu radnog medija solarnih kolektora od 80 °C i prosječnu vanjsku godišnju temperaturu učinkovitost solarnih kolektora je 60 % prema [34]. Pomoću dijagrama distribucijske krivulje specifičnog toplinskog učina [Slika 19.] dobivena je specifična dobivena toplinska energija koja iznosi 1054 W/m² kvadratnom na godišnjoj razini. Izgradnjom solarnih kolektora na cijeloj predviđenoj površini moguće je dobiti 3072 GWh toplinske energije godišnje.

3.3. Scenariji pokrivanja energetske potrebe Grada Dubrovnika korištenjem obnovljivih izvora energije uz skladištenje energije

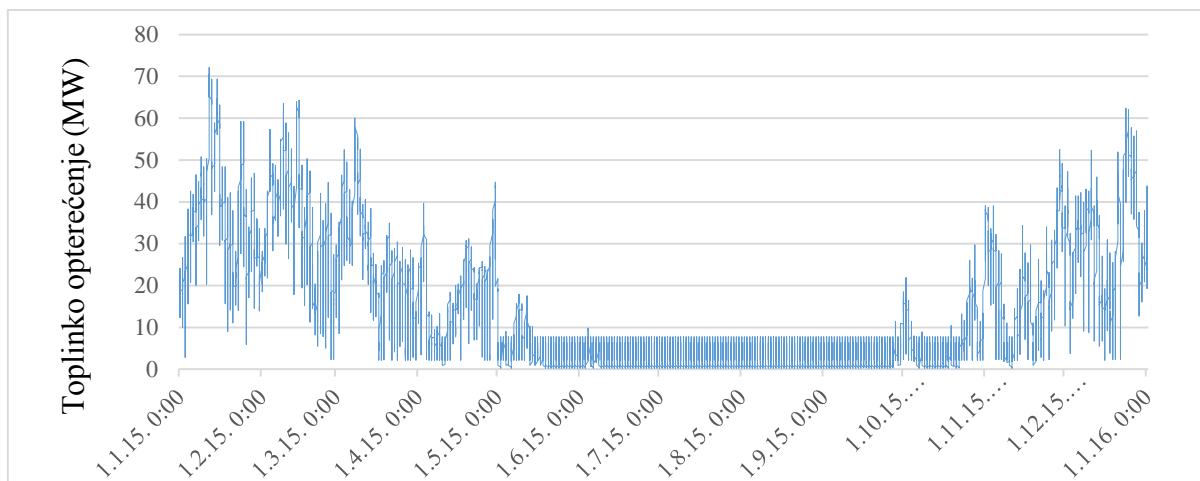
3.3.1. Distribucijske krivulje

Distribucijske krivulje na satnoj razini su preuzete iz ranije izrađenih studija za Grad Dubrovnik te će se koristiti pri izradi scenarija. Dijagrami su rađeni za potrošnje i kapacitete proizvodnje prema referentnom scenariju, osim ako nije drugačije rečeno.

Na slici [Slika 14.] je prikazan dijagram distribucijske krivulje električnog opterećenja koja ne sadrži u sebi opterećenje električne mreže za potrebe grijanja i hlađenja. Iz distribucijske krivulje vidljivo je kako se vršna vrijednost električnog opterećenja energije dostiže sredinom prosinca i iznosi 39 MW. Također je vidljivo kako je potrošnja električne energije najveća zimi i ljeti, a najmanja u proljeće i jesen.

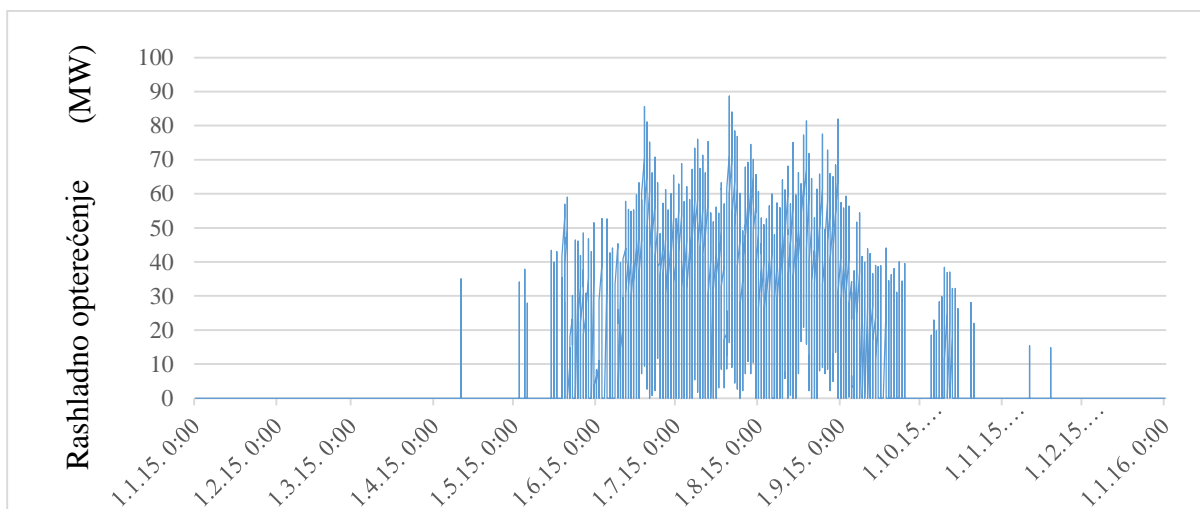


Slika 14. Distribucijska krivulja električnog opterećenja Grada Dubrovnika



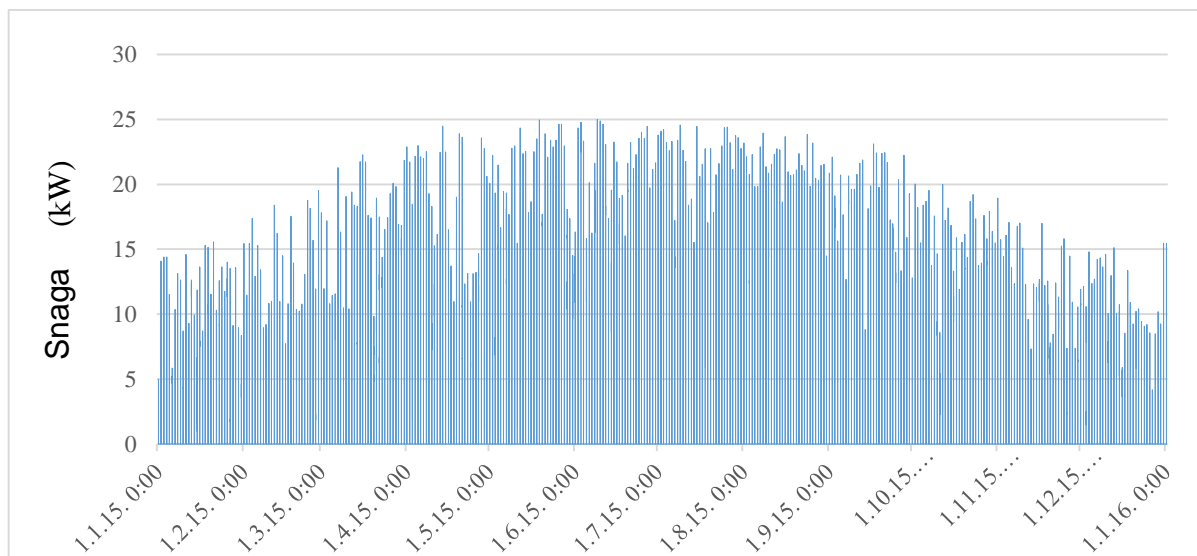
Slika 15. Distribucijska krivulja toplinskog opterećenja Grada Dubrovnika

Distribucijska krivulja toplinskog opterećenja [Slika 15.] postiže svoju vršnu vrijednost sredinom siječnja koja iznosi 72 MW. Vidimo kako je potrošnja toplinske energije najveća u zimskim mjesecima zbog potreba za prostornim grijanjem, dok je ljeti minimalna i troši se uglavnom za potrebe pripreme potrošne tople vode.



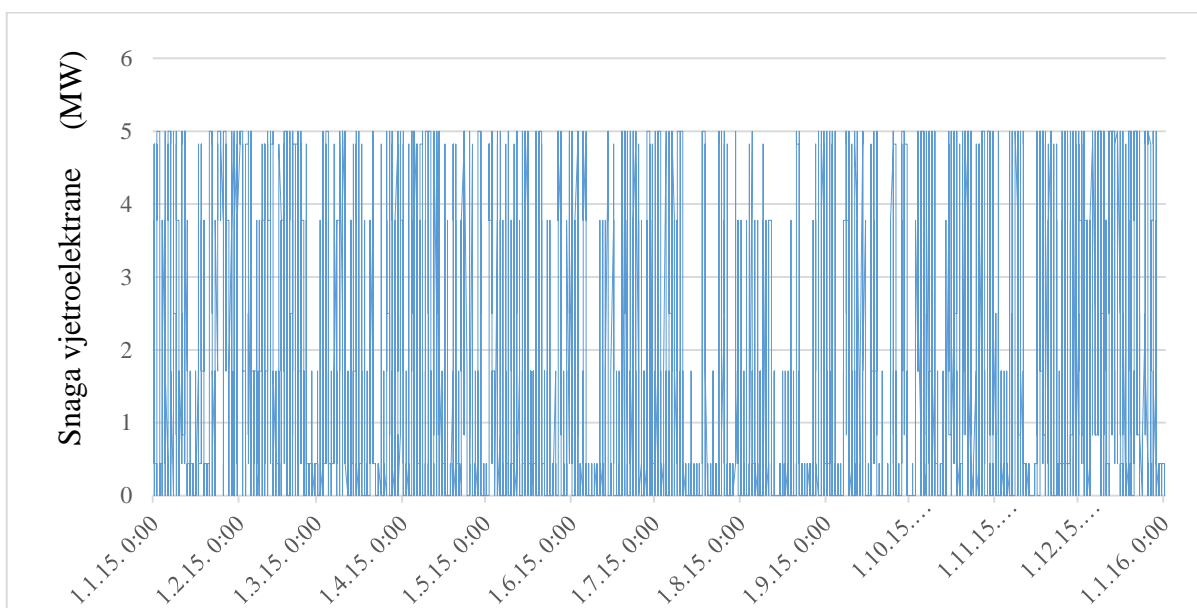
Slika 16. Distribucijska krivulja rashladnog opterećenja Grada Dubrovnika

Potreba za rashladnom energijom [Slika 16.] je najveća u ljetnim mjesecima. Najveće rashladno opterećenje je 89 MW.



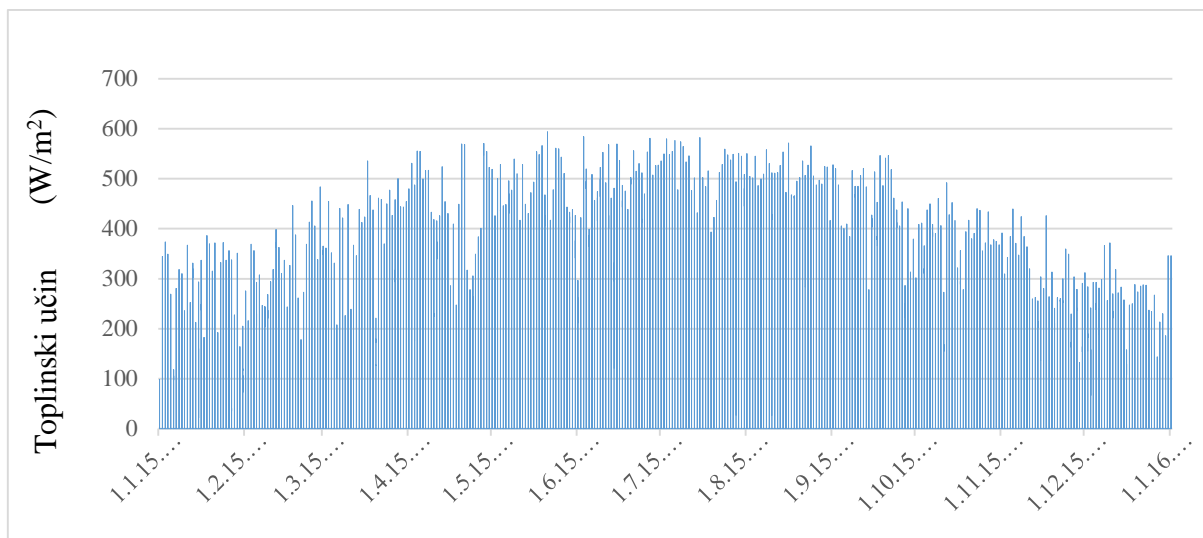
Slika 17. Distribucijska krivulja električne snage fotonaponskih panela za Grad Dubrovnik

Iz slike [Slika 17.] dijagrama distribucijske krivulje električne snage fotonaponskih panela vidimo da je najveća proizvodnja električne energije tijekom ljetnih mjeseci. Dijagram je rađen za srednje vrijednosti satnog globalnog zračenja na horizontalu i na optimalan kut zračenja (koji je za Dubrovnik 35°), za nazivnu snagu 25 kW fotonaponskih panela.



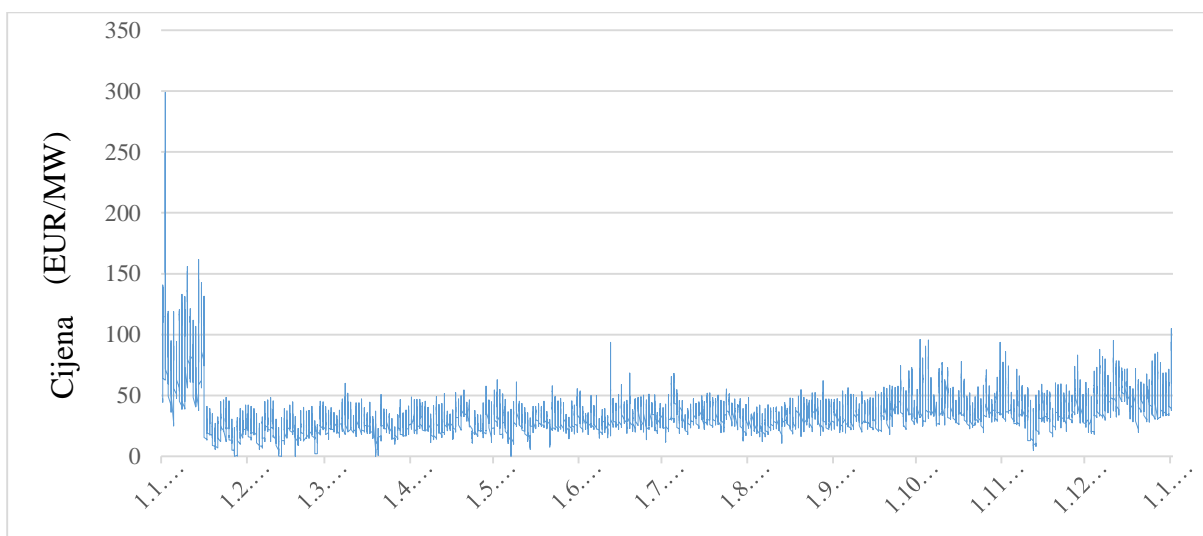
Slika 18. Distribucijska krivulja električne snage vjetroelektrana za Grad Dubrovnik

Dijagram distribucijske krivulje električne snage vjetroelektrana [Slika 18.] je rađen za vjetroelektranu maksimalne snage 5 MW. Iz dijagrama je vidljivo da je najmanja proizvodnja tijekom srpnja i kolovoza, što će utjecati na scenarije.



Slika 19. Distribucijska krivulja specifičnog toplinskog učina solarnih kolektora za Grad Dubrovnik

Dijagram distribucijske krivulje toplinskog učina [Slika 19.] rađen je za solarne kolektore nazivnog toplinskog učina prema proračunu u točki 3.2.3. Vidljivo je da je ljeti toplinska proizvedena energija iz solarnih kolektora najveća, tako da je prigodno korištenje apsorpcijskih dizalica topline za potrebe hlađenja.



Slika 20. Distribucijska krivulja cijene električne prve godine rada CROPEXa 2016.

Dijagram distribucijske krivulje cijene električne energije za 2016. godinu je rađen prema preuzetim cijenama s hrvatske burze električne energije CROPEX [35] za prvu godinu njezinog rada te će biti korišten za vrednovanje kupljene i prodane električne energije. Prosječna cijena je 37 EUR/MWh kupljene i prodane električne energije. U siječnju su cijene veće od uobičajenih jer je tada CROPEX omogućio pristupanje Unutardnevnom tržištu.

3.3.2. Podaci investicijskih, varijabilnih i fiksnih troškova

Podaci investicijskih, varijabilnih i fiksnih troškova preuzeti su iz baze podataka sa stranica EnergyPLAN računalnog programa [20] za 2020. godinu. Podaci troškova reverzibilne hidroelektrane, baterija i toplinskih spremnika korišteni su prema poglavlju 3.1.

3.3.3. Referentni scenarij za 2015. godinu

Referentni scenarij je modeliran prema ranije napravljenim studijama koje su izrađene prema Akcijskom planu energetske održivosti razvika i klimatskih promjena (SECAP) Grada Dubrovnika; [19].

Ukupna godišnja potrošnja električne energije je 244,401 GWh, od toga 19,04 GWh se troši na grijanje električnim grijalicama, 12,19 GWh na grijanje dizalicama topline, 24,06 GWh na hlađenje korištenjem split klima jedinica, a ostalih 189,11 GWh električne energije troši se za ostale potrebe. Dio električne energije je opskrbljen fotonaponskim modulima nazivne snage 25 kW, koji uz distribucijsku krivulju [Slika 17.] proizvode 40 MWh električne energije godišnje, ostatak potreba za električnom energijom se zadovoljava kupovinom s tržišta pomoću transmisijske linije koja može prenijeti 57 MW električne energije.

Što se tiče toplinske potražnje koristi se lož ulje u iznosu 25,33 GWh godišnje pri učinkovitosti izgaranja 80 %, uz korištenje lokalnih solarnih kolektora iz kojih se uz korištenje distribucijske krivulje [Slika 19.] proizvede 1,71 GWh toplinske energije, tako da je pokrivenost potreba za toplinske energijom iz lož ulja 20,264 GWh godišnje. Koristi se 16,53 GWh prirodnog plina s učinkovitošću 85 %, uz korištenje lokalnih solarnih kolektora iz kojih se uz korištenje distribucijske krivulje [Slika 19.] proizvede 0,79 GWh toplinske energije pa je pokrivenost potreba za toplinskom energijom iz prirodnog plina 14,05 GWh. Izgaranjem 51,767 GWh biomase uz učinkovitost od 85 % namiruje se potražnja za 44 GWh toplinske energije. Ostalih 30,48 GWh toplinske energije se namiruje iz dizalica topline i 19,04 GWh iz električnih grijalica. Ukupna potrošnja toplinske energije je 130,34 GWh.

Za hlađenje se koristi 67,37 GWh rashladnog kapaciteta, pri čemu je potrošnja električne energije 24,06 GWh.

Na transport se troši ukupno 269,84 GWh i to 189,762 GWh dizelskog goriva, 75,339 GWh benzina i 4,734 GWh ukapljenog naftnog plina, pomoću kojih se godišnje prijeđe 389 milijuna kilometara.

Godišnje se uveze 244,36 GWh električne energije po prosječnoj cijeni 37 EUR/MWh, izvoza električne energije iz sustava nema. Emitira se 82,48 kt CO₂, po cijeni 28,6 EUR/t CO₂. Tablica [Tablica 7.] prikazuje varijabilne troškove sustava. U tablici [Tablica 6.] prikazana je godišnja finalna potrošnja energije s tim da u potrošnju električne energije nisu pribrojene potrošnje električne energije za potrebe grijanja i hlađenja, tako da su prikazane vrijednosti koje su korištene u zadanim scenarijima, također je prikazana količina prijeđenih kilometara godišnje. Troškovi za usporedbu s drugim scenarijima su prikazani u tablici [Tablica 8.]

Tablica 6. Godišnja potrošnja finalne energije i godišnja količina prijeđenih kilometara u sektoru transporta referentnog scenarija za 2015. godinu

| | |
|---------------------------------|------------|
| Potrošnja električne energije | 189,11 GWh |
| Potrošnja toplinske energije | 130,34 GWh |
| Potrošnja rashladnog kapaciteta | 67,37 GWh |
| Količina prijeđenih kilometara | 389 Mkm |

Tablica 7. Varijabilni troškovi referentnog scenarija za 2015. godinu

| Godišnji varijabilni troškovi | MEUR |
|-----------------------------------|-------|
| Dizelsko gorivo | 13,24 |
| Benzin | 4,93 |
| Ukapljeni naftni plin | 0,19 |
| Prirodni plin | 0,54 |
| Biomasa | 1,72 |
| Uvoz električne energije u sustav | 9,12 |
| Plaćanje emisije CO ₂ | 2,36 |

Tablica 8. Ukupni godišnji troškovi referentnog scenarija za 2015. godinu

| | |
|--|-------|
| Godišnji ukupnu troškovi | MEUR |
| Ukupni varijabilni troškovi | 32,09 |
| Ukupni fiksni troškovi | 3,63 |
| Godišnji diskontirani investicijski troškovi | 15,70 |
| Ukupni godišnji troškovi | 51,42 |

3.3.4. Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz skladištenje energije u reverzibilnoj hidroelektrani

Potrošnja energije je definirana prema referentnom scenariju za 2015. godinu te je prikazana u tablici [Tablica 6.] Korištena potrošnja električne energije u simulaciji je 189,11 GWh godišnje. Toplinska potrošnja je razdijeljena 50 % na individualne, lokalne dizalice topline i 50 % na centralizirani sustav grijanja. Korištena vrijednost potrošnje lokalnih dizalica topline je 65,17 GWh godišnje uz godišnji faktor grijanja 3,25. Pokrivenost potreba za toplinskom energijom iz centraliziranog sustava grijanja je 72,411 GWh godišnje uz 10 % toplinskih gubitaka u mreži centraliziranog grijanja. Potrebe hlađenja su također podijeljene 50 % na individualne, lokalne dizalice topline i na 50 % opskrbe centralnim sustavom hlađenja, gdje su korištene apsorpcijske dizalice topline velikih snaga koje koriste toplinu iz sustava centraliziranog grijanja. Lokalne dizalice topline opskrbljuju sustav s 33,68 GWh rashladnog kapaciteta godišnje uz godišnji faktor hlađenja 3, tako da troše na godišnjoj razini 11,23 GWh električne energije. Apsorpcijske dizalice topline također opskrbljuju sustav s 33,68 GWh rashladnog kapaciteta, ali uz godišnji faktor hlađenja 2 korištenjem 16,84 GWh toplinske energije iz centraliziranog grijanja godišnje. Za potrebe prometa u simulaciji pretpostavljeno je korištenje električnih vozila, tako da se za prijedehnih 389 Mkm godišnje potroši 77,8 GWh električne energije. Korištene su distribucijske krivulje iz poglavlja 3.3.3. [Slika 14.] do [Slika 20.] uz iznimku distribucije za promet koja je korištena iz baze podataka EnergyPLAN računalnog programa [19], za potrebe centraliziranog grijanja korištena je distribucijska krivulja bez potrošnje potrošne tople vode.

Za potrebe opskrbe centraliziranog grijanja toplinskom energijom korištene su kompresijske dizalice topline velikih razmjera godišnjeg faktora grijanja 3,25, električne snage 15,077 MW, koje su u stanju sustavu centraliziranog grijanja predati 49 MW toplinskog učinka, a na godišnjoj razini opskrbe sustav s 89,25 GWh toplinske energije. Za potrebe opskrbe električnom energijom na raspolaganju su kako je proračunato u poglavljima 3.2.1. i 3.2.2. 200 MW vjetroelektrana te 45,877 MW fotonaponskih modula. Moguće je električnu energiju i

uvesti u sustav, ali je potrebno ostvariti barem jednak izvoz električne energije uvozu, kako bi sustav mogao biti 100 % obnovljivi.

Unošenjem podataka u EnergyPLAN sa snagama vjetroelektrane (20 MW) i fotonaponskih modula (20 MW), dobiveni su podaci godišnje proizvedene električne energije za vjetroelektranu (49,9 GWh) i za fotonaponske module (35,33 GWh). Vidljivo je da je uz diskontnu stopu od 5 % ukupni godišnji trošak vjetroelektrane 2317 kEUR, a fotonaponskih modula 1450 kEUR. Omjerom ukupnih godišnjih troškova i godišnje proizvedene električne energije dobivene su vrijednosti specifičnih godišnjih troškova proizvodnje energije iz vjetroelektrana (46,43 EUR/MWh) i fotonaponskih modula (41,04 EUR/MWh). Vrijednosti su uvrštene u tablicu [Tablica 9.] usporedbom kojih možemo zaključiti da je bolje koristiti više kapaciteta fotonaponskih modula, nego vjetroelektrana. Također je vidljivo iz distribucijskih krivulja [Slika 17.] i [Slika 18.] da je najmanja opskrba energijom iz vjetroelektrane u srpnju i kolovozu, a iz fotonaponskih modula je tada najveća. Zbog navedenih razloga u svim sljedećim simulacijama je korišten maksimalni kapacitet fotonaponskih panela koji iznosi 45,877 MW.

Tablica 9. Specifični troškovi proizvodnje energije iz vjetroelektrane i fotonaponskih modula

| | Nazivna snaga | Godišnje proizvedena električna energija | Ukupni godišnji troškovi | Specifični godišnji trošak proizvodnje energije |
|---------------------|---------------|--|--------------------------|---|
| Vjetroelektrana | 20 MW | 49,9 GWh | 2317 kEUR | 46,43 EUR/MWh |
| Fotonaponski moduli | 20 MW | 35,33 GWh | 1450 kEUR | 41,04 EUR/MWh |

Dalje su napravljene iteracije sustava prema minimalnom godišnjem trošku tako da nema nikakvog skladištenja energije, a da izvoz električne energije bude veći od uvoza, kako bi se sustav mogao smatrati 100 % obnovljivim. Godišnji minimalni troškovi koji su dobiveni iznose 36,36 MEUR. Korištena je vjetroelektrana snage 105 MW te transmisijska linija snage 73,5 MW. Uvezeno u sustav je 150,65 GWh električne energije, a izvezeno je 153,03 GWh, dakle možemo smatrati da je sustav 100 % obnovljiv. Kritični višak električne energije je 14,99 GWh, odnosno 4,37 % ukupno proizvedene energije te se baca u okoliš. Troškovi uvoza električne energije su 5,25 MEUR, dok je zarada na izvozu električne energije iz sustava 6,61 MEUR.

Zbog ograničenja simulacije u EnergyPLAN računalnom programu utjecaj promjene cijene električne energije zbog većih količina uvoza i izvoza nije moguće obuhvatiti zato jer model radi sa unaprijed zadanom krivuljom cijene električne energije.

Zatim je iteriran sustav tako da on bude samodostatan, tj. tako da nema izvoza ni uvoza električne energije u sustav. Ukupni godišnji troškovi sustava iznose 55 MEUR. Korištena je vjetroelektrana snage 115 MW, pumpa reverzibilne hidroelektrane električne snage 116 MW uz učinkovitost 90 %, turbina električne snage 75 MW uz učinkovitost 90 % te akumulacija vode kao spremnik energije kapaciteta 27 GWh. Prilikom izrade iteracija uočen je nedostatak EnergyPLAN modela u čijim je postavkama moguće definirati red veličina podataka i rezultata u modelu izborom "capacity units" koje mogu biti u kW, MW, GW. Nedostatak je taj da ako je "capacity units" u kW, maksimalna električna snaga pumpe i turbine je 99,99 MW, kako bi ona bila veća treba promijeniti postavke u MW, što ima za posljedicu korištenje vrijednosti s mnogo decimalnih mjesta zbog čega program automatski grubo zaokružuje većinu unesenih vrijednosti i rješenja, zbog čega se nepreciznost simulacije povećava. Ako uzmemo u obzir preciznost pretpostavki simulacije povećana nepreciznost simulacije zbog zaokruživanja je zanemariva.

Napravljene su i iteracije sustava koji ima omogućen uvoz i izvoz električne energije uz skladištenje energije u reverzibilnoj hidroelektrani. Tijekom iteriranja je primijećeno kako je jeftinije sustavu većinu vremena uvoziti električnu energiju, nego skladištiti je u reverzibilnoj elektrani. Sustav koristi 100 MW vjetroelektrana uz mogućnost uvoza i izvoza električne energije od 73,5 MW. Korištena je električna snaga pumpe od 47,5 MW uz učinkovitost 90 %, električna snaga turbine od 47,8 MW i učinkovitost 90 % te akumulacija vode kao spremnik energije kapaciteta 95 MWh. U sustav se uveze 145,23 GWh energije, a izveze se 145,26 GWh. Ukupni godišnji trošak sustava je 39,87 MEUR. Treba napomenuti kako ovaj sustav nije optimiziran do kraja po minimalnom godišnjem trošku sustava, već je rađen radi usporedbe. Sustav bi bio optimiziran do kraja kada ne bi bilo skladištenja energije.

3.3.5. Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje solarnih termalnih kolektora te centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava sa spremnicima toplinske i rashladne energije

U ovom scenariju simuliran je 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje solarnih kolektora te centraliziranog rashladnog sustava sa spremnicima toplinske energije za toplinu iz solarnih kolektora. Na žalost *EnergyPLAN* ne omogućava simuliranje spremnika rashladne

energije. Pošto tijekom cijele godine postoji potražnja za toplinskom energijom iz sustava centraliziranog grijanja, zbog potreba centraliziranog hlađenja, rađena je simulacija samo za tehnologiju skladištenja toplinske energije u metalnom spremniku, ostale tehnologije prikazane u ovom radu se koriste za sezonsko grijanje i nisu adekvatne za simulaciju u ovakvom scenariju. Za iteriranje simulacija korištene su potrošnje, distribucijske krivulje, snage apsorpcijskih dizalica topline te lokalnih dizalica topline jednake kao u poglavlju 3.3.4.

U iteriranim simulacijama za potrebe opskrbe centraliziranog grijanja toplinskom energijom korištene su kompresijske dizalice topline velikih razmjera godišnjeg faktora grijanja 3,25, električne snage 15,077 MW, koje su u stanju sustavu centraliziranog grijanja predati 49 MW toplinskog učina. Kompresijske dizalice topline velikih razmjera su korištene zato jer se iteriranjem pokazalo da ih je moguće u potpunosti zamijeniti samo sa sustavima koji koriste velike kapacitete solarnih kolektora s visokim troškovima. Za potrebe opskrbe električnom energijom na raspolaganju su kako je proračunato u poglavljima 3.2. 200 MW vjetroelektrana, 45,877 MW fotonaponskih modula, te solarni kolektori koji godišnje mogu maksimalno proizvesti 3072 GWh toplinske energije godišnje iz energije Sunca. Moguće je električnu energiju i uvesti u sustav te je potrebno ostvariti jednak izvoz električne energije uvozu, kako bi sustav mogao biti 100 % obnovljiv. Na žalost nemoguće je korištenjem distribucijske krivulje cijene električne energije [Slika 20.] i troškova prema poglavlju 3.3.4. dobiti manje troškove sustava sa skladištenjem energije nego bez, ali su iteracije simulacija svejedno napravljene radi usporedbe.

Iteriran je sustav koji koristi solarne termalne kolektore, ali bez skladištenja energije. Pokazalo se da najmanji godišnji trošak ima sustav koji koristi solarne kolektore koji mogu godišnje proizvesti 150 GWh toplinske energije, ali mogu opskrbiti sustav centralnog grijanja samo s 24,84 GWh energije, ostalih 64,41 GWh toplinske energije namiruju kompresijske dizalice topline velikih razmjera. Sustav također koristi 105 MW vjetroelektrana koji godišnje proizvedu 261,99 GWh električne energije. U sustav se godišnje uveze 146,92 GWh električne energije, a izveze se 155,8 GWh preko transmisijske linije koja može uvesti i izvesti 73,5 MW. Ukupni godišnji trošak sustava je 39,95 MEUR. Potrebna je ukupna površina solarnih kolektora koja iznosi 0,1423 km².

Iteriran je i sustav koji koristi uz solarne kolektore i spremnik skladištenja toplinske energije. Pokazalo se da toplinski spremnik koji je moguće modelirati u EnergyPLAN modelu za potrebe toplana nema utjecaja na proizvodnju toplinske energije iz dizalica topline velikih razmjera,

tako da nije korišten u iteracijama. U sustavu se koriste solarni termalni kolektori koji godišnje proizvedu 200 GWh toplinske energije, uz toplinski spremnik kapaciteta 500 MWh uz 5 % gubitaka može predati sustavu centraliziranog grijanja 60,95 GWh toplinske energije godišnje. U sustavu se koristi vjetroelektrana snage 95 MW koja sustavu predaje 237,04 GWh električne energije. U sustav se uveze 141,57 GWh električne energije, a izveze 141,77 GWh preko transmisijske linije koja može uvesti i izvesti 71,5 MW. Ukupni godišnji trošak sustava je 40,39 MEUR. Ukupna površina korištenih solarnih kolektora iznosi 0,1898 km².

3.3.6. *Scenarij 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje baterija za skladištenje električne energije*

U ovom scenariju simuliran je 100 % obnovljivi Grad Dubrovnik uz korištenje natrij-sumpornih baterija za skladištenje električne energije. Za simulacije sustava su izabrane natrij-sumporne baterije zato jer prema poglavljima 3.1.2 do 3.1.5. imaju najmanje specifične troškove sustava skladištenja energije od svih proračunatih baterija. Potražnje, distribucijske krivulje, električne snage dizalica toplina su identične kao u poglavlju 3.3.4. Vrijednosti investicijskih, varijabilnih i fiksnih troškova te životni vijek reverzibilne hidroelektrane su prilagođene u *EnergyPLAN* modelu tako da simuliraju sustav s natrij-sumpornim baterijama. Scenarij je rađen sa diskontnom stopom 5 %.

Simuliran je scenarij tako sustav da bude samodostatan, tj. tako da nema izvoza ni uvoza električne energije u sustav. Ukupni godišnji troškovi sustava iznose 921 MEUR. Korištena je vjetroelektrana snage 200 MW koja proizvede 500 GWh električne energije godišnje. Baterije su iskoristivog kapaciteta 14,25 GWh, a mogu se puniti i prazniti snagom 219 MW uz učinkovitosti punjenja i pražnjenja od 89,44 %.

Iteriran je scenarij sa sustavom kod kojeg je omogućen uvoz i izvoz električne energije uz skladištenje energije u baterijama. Tijekom iteriranja je primijećeno kako je sustavu većinu vremena jeftinije uvoziti električnu energiju, nego skladištiti je u baterijama. Sustav koristi 105 MW vjetroelektrana uz mogućnost uvoza i izvoza električne energije od 73,5 MW. Vjetroelektrane proizvedu godišnje 261,99 GWh električne energije. Baterije su iskoristivog kapaciteta 95 MWh, a mogu se puniti i prazniti električnom snagom 47,8 MW uz učinkovitosti punjenja i pražnjenja 89,44 %. U sustav se uveze 142,64 GWh električne energije, a izveze se 153,03 GWh. Ukupni godišnji trošak sustava je 42,44 MEUR. Treba napomenuti kako ovaj sustav nije optimiziran do kraja po minimalnom godišnjem trošku sustava, već je rađen radi usporedbe. Sustav bi bio optimiziran do kraja kada ne bi bilo skladištenja energije.

3.3.7. Usporedba

U tablicama [Tablica 10.] i [Tablica 11.] prikazani su troškovi simuliranih scenarija. Svi scenariji osim referentnog su 100 % obnovljivi. Vidljivo je kako su troškovi samodostatnog scenarija sa skladištenjem energije u natrij-sumpornim baterijama najveći zbog visokih investicijskih troškova, zbog čega još uvijek nije uobičajeno korištenje banki baterija za skladištenje energije velikih razmjera. Također je vidljivo kako su najmanji troškovi u scenariju u kojem nema nikakvog skladištenja energije, to je zato jer nije u obzir uzeta elastičnost cijene električne energije ovisno o količini energije koja se uvozi ili izvozi na tržište, razlog tome je korištenje unaprijed definirane cijene električne energije u svakom satu tijekom godine. Svi scenariji osim samodostatnog sa skladištenjem električne energije u reverzibilnoj hidroelektrani i samodostatnog sa skladištenjem u natrij-sumpornim baterijama imaju manje troškove od referentnog scenarija za 2015. godinu. Ako se smanji diskontna stopa s 5 % na 3 % ukupni godišnji troškovi samodostatnog scenarija sa skladištenjem električne energije u reverzibilnoj hidroelektrani postaju manji od ukupnih troškova referentnog scenarija. Ukupni godišnji troškovi referentnog scenarija su relativno visoki u odnosu na većinu drugih scenarija zbog visokih varijabilnih troškova koji se najviše sastoje, kako je prikazano u tablici [Tablica 7.], od troškova na dizelsko gorivo 13,24 MEUR i troškova uvoza električne energije od 9,12 MEUR jer nema instaliranih velikih elektrana. Varijabilni troškovi koji su u minusu ukazuju da je uvoz električne energije veći od izvoza te da postoji zarada na izvozu.

Tablica 10. Troškovi scenarija s diskontnom stopom sustava 5 %

| | Diskontirani godišnji investicijski troškovi [MEUR] | Varijabilni troškovi [MEUR] | Fiksni troškovi [MEUR] | Ukupni godišnji troškovi [MEUR] |
|--|---|-----------------------------------|------------------------------|--|
| Referentni scenarij za 2015. godinu | 15,70 | 32,09 | 3,63 | 51,42 |
| Scenarij s uvozom električne energije bez skladištenja energije | 30,10 | -0,74 | 7,00 | 36,36 |

| | | | | |
|---|-------|-------|------|-------|
| Scenarij bez uvoza električne energije sa skladištenjem energije u reverzibilnoj hidroelektrani | 43 | 0 | 11 | 55 |
| Scenarij s uvozom električne energije i skladištenjem u reverzibilnoj hidroelektrani | 32,83 | -0,69 | 7,73 | 39,87 |
| Scenarij s uvozom električne energije i korištenjem solarnih kolektora bez skladištenja energije | 33,87 | -0,99 | 7,07 | 39,95 |
| Scenarij s uvozom električne energije i korištenje solarnih kolektora uz skladištenje toplinske energije u metalnom spremniku s vodom | 34,22 | -0,64 | 6,80 | 40,39 |
| Scenarij bez uvoza električne energije i sa skladištenjem u natrij-sumpornim baterijama | 747 | 0 | 174 | 921 |
| Scenarij s uvozom električne energije i sa skladištenjem u natrij-sumpornim baterijama | 45,31 | -1,10 | 8,23 | 42,45 |

Tablica 11. Troškovi scenarija s diskontnom stopom sustava 3 %

| | Diskontirani godišnji investicijski troškovi [MEUR] | Varijabilni troškovi [MEUR] | Fiksni troškovi [MEUR] | Ukupni godišnji troškovi [MEUR] |
|---|---|-----------------------------------|------------------------------|--|
| Referentni scenarij za 2015. godinu | 12,64 | 32,09 | 3,63 | 48,37 |
| Scenarij s uvozom električne energije bez skladištenja energije | 24,77 | -0,74 | 7,12 | 31,15 |
| Scenarij bez uvoza električne energije sa skladištenjem energije u reverzibilnoj hidroelektrani | 34 | 0 | 11 | 45 |
| Scenarij s uvozom električne energije i skladištenjem u reverzibilnoj hidroelektrani | 26,67 | -0,69 | 7,86 | 33,82 |
| Scenarij s uvozom električne energije i korištenjem solarnih kolektora bez skladištenja energije | 27,36 | -0,99 | 7,07 | 33,45 |
| Scenarij s uvozom električne energije i korištenje solarnih kolektora uz skladištenje toplinske energije u metalnom spremniku s vodom | 27,60 | -0,64 | 6,80 | 33,77 |
| Scenarij bez uvoza električne energije i sa skladištenjem u natrij- sumpornim baterijama | 638 | 0 | 174 | 813 |
| Scenarij s uvozom električne energije i sa skladištenjem u natrij- sumpornim baterijama | 28,84 | -1,10 | 8,23 | 35,99 |

4. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme razvijene su mnoge tehnologije skladištenja energije. Danas se zasigurno za skladištenje energije velikih razmjera najčešće koriste reverzibilne hidroelektrane za skladištenje u obliku potencijalne energije te razni spremnici punjeni vodom za skladištenje toplinske i rashladne energije korištenjem osjetne topline. Osim reverzibilnih hidroelektrana za čiju izgradnju su potrebni prostorni uvjeti postojanja dvije akumulacije na dovoljno velikoj nadmorskoj visini, moguće je korištenje raznih baterija za čije korištenje je potreban samo prostor na kojem bi se banke baterija instalirale. Velika mana baterija su visoki investicijski troškovi. U ovom radu je napravljen pregled i mnogih drugih tehnologija skladištenja energije, nekih za koje tek postoje prototipni sustavi i postoji puno prostora za poboljšanjem učinkovitosti te onih koje su dostigle svoju zrelost i kod kojih nema previše prostora za poboljšanjem.

Izračunati su specifični troškovi sustava koji imaju potencijala koristiti se kao spremnici energije velikih razmjera. Od tehnologija skladištenja električne energije najmanje specifične troškove po MWh ima reverzibilna hidroelektrana (9,93 EUR/MWh, 4,35 MEUR/MW) nakon nje slijedi sustav s natrij-sumpornim baterijama (125,4 EUR/MWh, 8,02 MEUR/MW), dok najveće specifične troškove po MWh ima sustav skladištenja električne energije u vodiku (557,14 EUR/MWh) zbog niske učinkovitosti pražnjenja sustava energijom (43 %). Vodik ima najmanji specifični trošak po MW (4,02 MEUR/MW), zbog metodologije računanja režima rada. Najniže specifične troškove po MWh toplinske energije ima sustav skladištenja toplinske energije u metalnom spremniku s vodom (6,87 EUR/MWh), zato što je jedini sustav koji se puni i prazni toplinskom energijom na tjednoj bazi, ostale tehnologije skladištenja toplinske energije za koje je rađen proračun služe sezonskom skladištenju toplinske energije te se pune i prazne energijom jednom godišnje, od njih najmanji specifični trošak ima sustav skladištenja toplinske energije u izoliranoj jami punjenoj s vodom (34,25 EUR/MWh). Tehnologija skladištenja toplinske energije koja ima najveći specifični trošak je tehnologija geotermalnog skladištenja toplinske energije (143,35 EUR/MWh) zbog niske učinkovitosti sustava (32 %) i visokih investicijskih troškova iskapanja bušotina. Tehnologije skladištenja rashladne energije imaju bolju učinkovitost od tehnologija skladištenja toplinske energije zbog toplinskih režima koji su bliži okolišnim temperaturama, ali imaju manji toplinski kapacitet zbog manjeg raspona temperatura skladištenja rashladnog kapaciteta, tako da su specifični troškovi višestruko viši u odnosu na tehnologije skladištenja toplinske energije.

Izradom raznih simulacija scenarija 100 % obnovljivog Grada Dubrovnika korištenjem *EnergyPLAN* modela dobiveni su ukupni godišnji troškovi simuliranih energetske sustava. Zbog korištenja unaprijed zadanih cijena uvoza i izvoza električne energije scenarij s najmanjim ukupnim troškovima sustava je upravo onaj koji nema nikakvo skladištenje energije (36,36 MEUR). Ako bismo gledali samodostatnost energetske sustava Grada Dubrovnika najniže troškove ima sustav koji koristi reverzibilnu hidroelektranu (55 MEUR) i to 16,75 puta manje od energetske sustava koji koristi natrij-sumporne baterije za koje se ispostavilo da imaju najmanje specifične troškove od svih proračunatih sustava s baterijama. U *EnergyPLAN* računalnom programu nije moguće direktno računati skladištenje rashladne energije. Prilikom računanja samodostatnih sustava u postavkama programa bilo je potrebno promijeniti "Capacity units" iz kW u MW zbog nemogućnosti unošenja podataka snaga turbina i pumpa reverzibilne hidroelektrane većih od 99,99 MW ako su postavke u kW. Promjenom je bilo potrebno unositi podatke u program s puno decimala pri čemu su mnoge vrijednosti automatski zaokruživane u modelu, zbog čega je povećano odstupanje u preciznosti simulacije, ali zanemarivo zbog korištenih pretpostavki sustava. U odnosu na referentni model iz 2015. godine svi scenariji osim onih sa samodostatnim sustavima imaju manje ukupne godišnje troškove uz diskontnu stopu 5 %. Uz diskontnu stopu 3 % samo samodostatni sustav s natrij-sumpornim baterijama ima veće ukupne troškove od referentnog sustava.

LITERATURA

- [1] Ter-Gazarian, A. G.: Energy Storage for Power Systems, The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2011.
- [2] Aneke, M., Wang, M.: Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Applied Energy, 2016., 179, 350-377
- [3] http://www.think-grid.org/sites/default/files/THINKGRID_PUMPED_STORAGE_830_0.jpg
- [4] Rehman, S., Al-Hadhrami, L., Alam, M. M.: Pumped hydro energy storage system: A technological review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44., 586-598
- [5] Dincer, I., Rosen, M. A.: Thermal Energy Storage: Systems And Applications, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, Ontario, Canada, 2011.
- [6] Molina, M. G.: Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage of Power System Applications, CONICET, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2010.
- [7] Petrsen, T., Elmegaard, B., Pedersen, A. S.: Adiabatic Liquid Piston Compressed Air Energy Storage, Danish Technological Institute, 2013.
- [8] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V.: Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009., 13, 1513-1522
- [9] <http://www.gravitypower.net/>
- [10] <https://www.greenoptimistic.com/gravel-energy-storage/#.WcSrCbIjGUL>
- [11] <http://www.aresnorthamerica.com/grid-scale-energy-storage>
- [12] Schogl, R.: Chemical Energy Storage, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 2013.
- [13] Electrical Energy Storage, White Paper, IEC, Geneva, 2011.
- [14] Komljenović, A.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [15] Rutz, D., Doczekal, C., Zweiler, R., Hofmeister, M., Jensen, L. L.: Mali modularni obnovljivi centralizirani toplinski i rashladni sustav, WIP Renewable Energies, München, 2017.
- [16] Kalaiselvam, S., Parameshwaran, R.: Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability, Elsevier, London, 2014.
- [17] https://vizkultura.hr/wp-content/uploads/2016/10/DJI_0006.jpg

- [18] Elmegaard, B., Christensen, C. H., Kjoller, C., Elefsen, C., Hansen, J. B., Hvid, J., Sorensen, P. A., Vangkilde-Pedersen, T., Kaer Knudsen, S., Jensen, T. F.: Status and recommendations for RD&D on energy storage technologies in a Danish context, Danish Energy Authority, Energinet.dk, the Danish Council for Strategic Research, the Danish Energy Association, 2014.
- [19] Grbavac, I., Krajačić, G., Matak, N., Dobravec, V., Burić, I., Kodba, B., Cosmai, M., Pilato, A. M.: Akcijski plan energetske održivog razvitka i klimatskih promjena (SECAP) Grada Dubrovnika, Agencija za energetiku i informacijske tehnologije, Dubrovnik, 2017.
- [20] <http://www.energyplan.eu/>
- [21] <https://www.google.hr/maps>
- [22] <https://www.daftlogic.com/projects-google-maps-distance-calculator.htm>
- [23] <https://www.daftlogic.com/projects-google-maps-area-calculator-tool.htm>
- [24] Rastler, D.: Electricity Energy Storage Technology Options, Electric Power Research Institute, California, 2010.
- [25] Skupina autora: Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells, International Energy Agency, Paris, 2015.
- [26] Skupina autora: Technology Data for Energy Plants, Danish Energy Agency, København, 2017.
- [27] Espagnet, A. R.: Techno-Economic Assessment of Thermal Energy Storage integration into Low Temperature District Heating Networks, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2016.
- [28] Semple, L., Cariveau, R., Ting, D. S. K.: Techno-Economic Analysis of Seasonal Thermal Energy Storage for Greenhouse Applications, Energy and Building, 2017.
- [29] Comodi, G., Carducci, F., Sze, Y. J., Balmurgan, N., Romagnoli, A.: Storing energy for cooling demand management in tropical climates: a technoeconomic comparison between different energy storage technologies, Energy, 2017., 121, 676-694
- [30] http://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_en.php
- [31] <http://www.qgis.org/en/site>
- [32] <http://www.solvis.hr/hr/product/polikristalinicni-moduli/>
- [33] <http://www.dhmz.htnet.hr>
- [34] Solar district heating guidelines, Collection of fact sheets, 2012
- [35] <https://www.cropex.hr/hr/>

PRILOZI

I. CD-R disc